



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

## 3D TISK OPTOMECHANICKÝCH ZAŘÍZENÍ

3D PRINTED OPTO-MECHANICAL DEVICES

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vendula Šremrová

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Jákl, Ph.D.

BRNO 2021



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství  
Studentka: **Bc. Vendula Šremrová**  
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství  
Studijní obor: Přesná mechanika a optika  
Vedoucí práce: **Ing. Petr Jákl, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## 3D tisk optomechanických zařízení

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nové technologie umožňují rapidně zkrátit vývojový cyklus nových zařízení. S využitím 3D tiskáren lze vytvořit prototyp drobnějších součástek v řádu jednotek hodin. Práce zahrnuje rešerši materiálů a technik používaných při 3D tisku, zvládnutí technologie, návrh a výrobu optomechanických komponent určených pro optickou laboratoř. Experimentálně bude ověřena funkce optomechanických komponent a jejich časová stálost a stabilita při změnách teploty v laboratoři. Součástky budou porovnány s komerčně dostupnými prvky vyrobenými z kovu (hliníkové slitiny, ocel). V rámci diplomové práce budou navrženy statické elementy (držáky čoček, zrcátek, štěrbin), pohyblivé elementy (manipulátory a kinematické držáky) a získané zkušenosti se využijí při konstrukci komplexního mechanismu zahrnujícího mechanické i elektrické součástky (krokový motor, detektory polohy, fotodioda), které budou vhodně kombinovány s částmi vzniklými 3D tiskem. Návrh a zhotovení bude kompletní, tj. mechanický návrh, výroba, sesazení a elektrické zapojení včetně základního software pro ovládání, vyčítání parametrů a zobrazení naměřených dat ve vhodné reprezentaci.

### Cíle diplomové práce:

- 1/ Rešerše materiálů a technik pro 3D tisk.
- 2/ Návrh a výroba statických i pohyblivých mechanismů.
- 3/ Návrh řízení a příprava základního software k ovládání mechanismu.
- 4/ Ověření funkčnosti polymerových zařízení a jejich srovnání s komerčně dostupnými kovovými alternativami.

**Seznam doporučené literatury:**

SALAZAR-SERRANO, Luis José, Juan P. TORRES, Alejandra VALENCIA a Luis CARRETERO. A 3D Printed Toolbox for Opto-Mechanical Components. PLOS ONE. 2017, 12(1), 0169832. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0169832

SHARKEY, James P., Darryl C. W. FOO, Alexandre KABLA, Jeremy J. BAUMBERG a Richard W. BOWMAN. A one-piece 3D printed flexure translation stage for open-source microscopy. Review of Scientific Instruments. 2016, 87(2), 025104. ISSN 0034-6748. Dostupné z: doi:10.1063/1.4941068

YODER, Paul R. Mounting optics in optical instruments. 2nd ed. Bellingham (Washington): SPIE, 2008. ISBN 978-0-8194-7129-1.

COLLETT, Edward. Field Guide to Polarization. Bellingham (Washington): SPIE, 2005. ISBN 0-819-5868-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Optomechanické komponenty jsou široce využívány v mnoha optických experimentech. Tato diplomová práce se zabývá návrhem a výrobou optomechanických komponentů pomocí 3D tisku, které budou levnější alternativou komerčních zařízení. Kromě 3D tištěných dílů je pro sestavení funkčních zařízení využit minimální počet dalších součástek. Pomocí jednoduchých experimentálních sestav jsou vyrobené komponenty hodnoceny a porovnány s komerčně dostupnými. Výsledky naznačují, že tato zařízení lze využít v aplikacích, kde není vyžadována vysoká přesnost. Druhá část je věnována návrhu a výrobě polarimetru jako komplexního mechanismu kombinujícího elektrické a mechanické součástky s díly vytištěnými na 3D tiskárně. Slouží k měření některých vlastností polarizovaného světla.

## **Summary**

Optomechanical components are widely used in many optical experiments. This diploma thesis deals with a design and manufacturing of optomechanical components using 3D print technology. These are cheaper alternatives of commercial devices. In addition to 3D printed parts, minimum number of other components is used to assemble functional devices. Using simple experimental setups, the manufactured components are evaluated and compared with commercially available ones. The results show that they can be used in applications where high accuracy is not required. The second part is devoted to the design and manufacturing of a polarimeter as a mechanism combining electrical and mechanical components with 3D printed parts. The polarimeter is used to measure some properties of polarized light.

## **Klíčová slova**

3D tisk, Přesná mechanika, Optomechanické komponenty, Polarizace, Jonesovy matice

## **Keywords**

3D printing, Precision mechanics, Optomechanical components, Polarization, Jones matrix calculus



ŠREMROVÁ, Vendula. 3D tisk optomechanických zařízení [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132579>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství. Vedoucí práce Petr Jákl.





### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení Ing. Petra Jákla Ph.D., s použitím literatury, která je citovaná a uvedená v seznamu zdrojů.

.....

V Brně 20.5.2021



## **Poděkování**

Tímto bych chtěla poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Jáklovi Ph.D. za jeho čas a poskytnuté odborné rady a připomínky. Dále bych ráda poděkovala své rodině a blízkým za podporu během studia



## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>3D tisk.....</b>	<b>5</b>
2.1	Technologie 3D tisku.....	5
2.1.1	Výroba pomocí taveného vlákna.....	6
2.2	Polymerní materiály používané v 3D tisku.....	8
2.2.1	ABS .....	8
2.2.2	PLA.....	9
2.2.3	PETG .....	9
2.3	Využití 3D tisku v optických laboratořích.....	10
<b>3</b>	<b>Dostupné komerční optomechanické komponenty .....</b>	<b>14</b>
3.1	Kinematická uložení .....	14
3.2	Posuvné systémy.....	15
<b>4</b>	<b>Polarizace světla .....</b>	<b>17</b>
4.1	Polarizované světlo .....	17
4.1.1	Eliptická polarizace .....	20
4.1.2	Kruhová polarizace.....	21
4.1.3	Lineární polarizace .....	21
4.2	Polarizátory .....	21
4.3	Maticový popis stavu polarizace světelných vln pomocí Jonesových vektorů .....	22
<b>5</b>	<b>Motivace a cíle práce.....</b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b>Návrhy a výroba optomechanických komponentů .....</b>	<b>29</b>
6.1	Specifikace 3D tištěných polymerních dílů .....	30
6.1.1	Smršťování .....	30
6.1.2	Pružnost .....	31
6.2	Nastavení tisku.....	32

6.3	Statický držák .....	33
6.4	Lineární posuv XY .....	33
6.5	Tříbodové kinematické uložení .....	35
6.6	Lineární posuv Z .....	37
<b>7</b>	<b>Ověření funkčnosti.....</b>	<b>39</b>
7.1	Testování vyrobených polymerních komponentů .....	39
7.2	Porovnání s komerčně dostupnými zařízeními .....	47
<b>8</b>	<b>Návrh a výroba polarimetru.....</b>	<b>51</b>
8.1	Elektrické a mechanické součástky .....	51
8.2	Vytištěné díly .....	53
8.3	Nastavení řízení polarimetru .....	57
8.4	Ověření funkčnosti .....	59
<b>9</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>63</b>

# 1 Úvod

Optomechanické komponenty jsou široce využívány v mnoha optických experimentech, fotonice, mikroskopii apod. Jsou ale poměrně finančně nákladné. 3D tisk z polymerních materiálů je v posledních letech příznivou alternativou pro výrobu některých optomechanických komponentů. V dnešní době je 3D tisk uživatelsky i cenově snadno dostupný. Díky volně dostupným knihovnám mohou být mechanické návrhy rychle vylepšovány a sdíleny, některé oblasti výzkumu ve fotonice a dalších příbuzných oborech, ve kterých není vyžadována extrémně vysoká přesnost, se stává dostupnější i pro regiony s omezenými zdroji. Stále jsou ale k sestavení funkčních zařízení potřeba klasické součástky jako pružinky, tyče, šrouby apod. Cílem mé diplomové práce je návrh komponentů, které budou funkční s využitím co nejmenšího počtu dalších součástí a budou u nich zohledněny a využity vlastnosti polymerních materiálů. Komponenty budou hodnoceny z hlediska snížení nákladů, rychlosti výroby a vlastností v porovnání s komerčně dostupnými zařízeními.

Další částí mé diplomové práce je návrh a výroba polarimetru jako komplexního mechanismu, kde jsou kombinovány elektrické a mechanické součástky s díly vytisknutými na 3D tiskárně. Toto jednoduché zařízení slouží k popsání některých vlastností polarizovaného světla. Předpokládanou výhodou je jednoduché sestavení a nízké náklady na výrobu.

Teoretická část je věnována aditivní výrobě, a především metodě výroby pomocí taveného vlákna a vybraným polymerním materiálům. Dále jsou představeny komerčně vyráběné optomechanické komponenty. V další části se zabývám teorií polarizace a popsáním polarizovaného světla maticovým přístupem pomocí Jonesových vektorů.





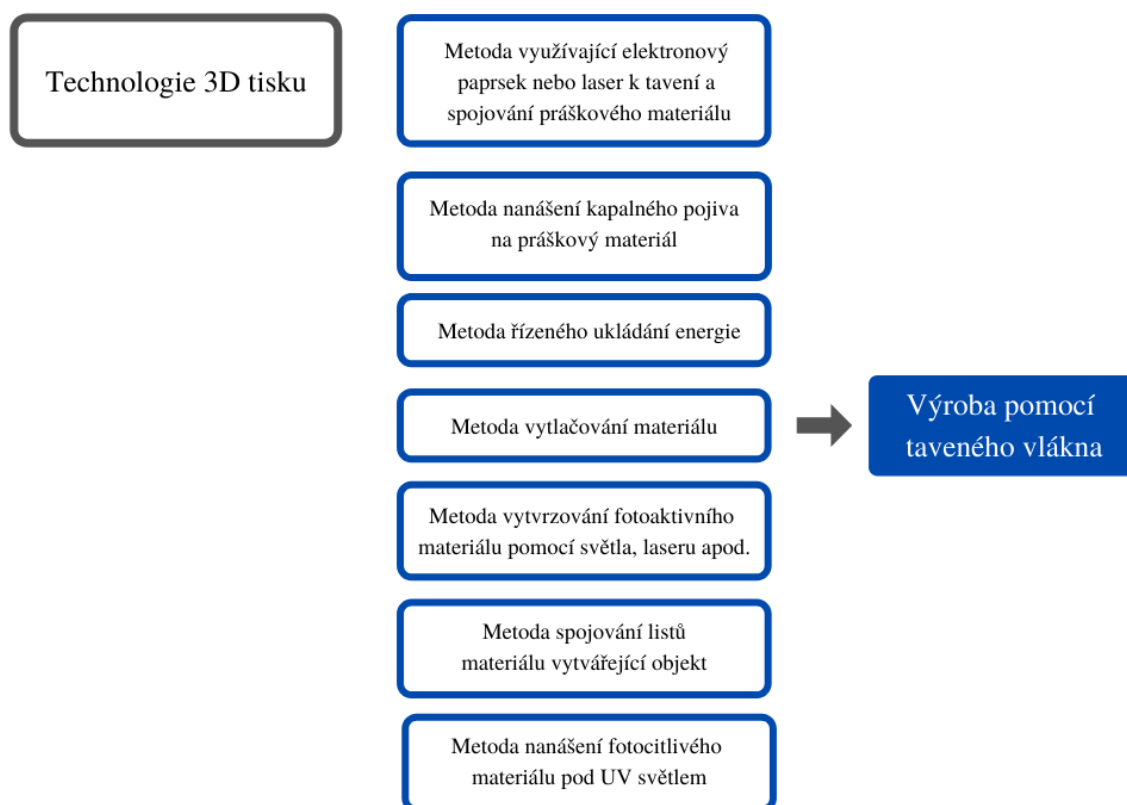
## 2 3D tisk

### 2.1 Technologie 3D tisku

Aditivní výroba neboli trojrozměrný tisk je založen na principu vytváření objektů vrstvením materiálu na základě modelů počítačově podporovaného designu (CAD). Tato technologie umožňuje různorodost návrhů, dovoluje výrobu konvenčně nepřipustných geometrií a funkčně složitých dílů [1].

Aditivní výroba většinou nevyžaduje použití procesních nástrojů a nepřímého spotřebního materiálu, čímž se efektivně zkracuje čas výroby [2]. S tím souvisí i úspora energie a snížení množství požadovaného materiálu, což by mohlo vést k výrobním postupům šetrnějším k životnímu prostředí. Tato oblast ale ještě není ve větší míře prozkoumána. V porovnání s konvenční výrobou je aditivní výroba teoreticky o 97% materiálově efektivnější, ale v praxi je tato hodnota zpravidla výrazně nižší. Spotřeba energie se může zvýšit např. nízkou produktivitou, a to zejména u technologií, které vyžadují zdlouhavé zpracování při vysoké teplotě. Co se týče šetrnosti k životnímu prostředí, tak aditivní výroba oproti subtraktivní výrobě používá méně škodlivých chemikálií. Např. metoda výroby pomocí taveného vlákna používá netoxické termoplastické materiály jako je PLA (kyselina polymléčná), PET (polyethyléntereftalát) a ABS (akrylonitrilbutadienstyren). Obecně lze říct, že i přes to, že má aditivní výroba omezený výběr materiálů, nižší produktivitu procesu nebo nižší přesnost geometrických rozměrů, jsou zde významné výhody jako např. méně energeticky náročné a znečišťující výrobní procesy, menší množství použitých výrobních materiálů a flexibilita návrhů [3].

Existuje několik různých technologií 3D tisku, přičemž jejich využití se odvíjí od konkrétní aplikace a použitých materiálů. Podle ASTM (Americká společnost pro testování a materiály) [4] jsou technologie aditivní výroby rozděleny do sedmi základních kategorií (Obrázek 1). Patří sem metoda vytlačování materiálu, do které patří výroba pomocí taveného vlákna. Dále je to metoda využívající elektronový paprsek nebo laser k tavení a spojování práškového materiálu, metoda nanášení kapalného pojiva na práškový materiál, metoda řízeného ukládání energie, metoda vytvrzování fotoaktivního materiálu pomocí světla, laseru apod., metoda spojování listů materiálu vytvářející objekt a metoda nanášení fotocitlivého materiálu pod UV světlem.



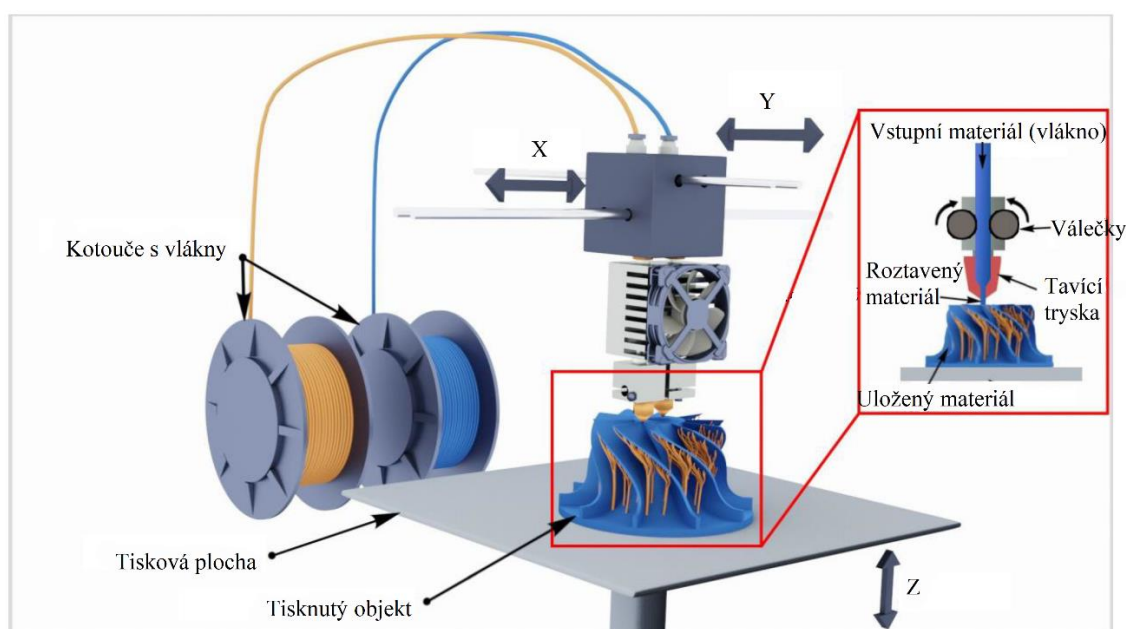
Obrázek 1: Technologie 3D tisku rozdělené do sedmi kategorií podle ASTM [4].

V mé diplomové práci budu využívat tiskárny pracující na principu FFF (Fused Filament Fabrication) neboli výroby pomocí taveného vlákna. Je to nejběžněji používaná metoda k 3D tisku polymerních materiálů. Jedním z důvodů je rychlost výroby, jednoduchost a cenová dostupnost. Zároveň umožňuje použití široké škály materiálů k tisku [1].

### 2.1.1 Výroba pomocí taveného vlákna

Výroba pomocí taveného vlákna je oblíbená a oceňovaná technologie 3D tisku. Pokrývá 69% aditivní výroby. Umožňuje inovace v oblasti průmyslu, efektivní řešení pro ověřování a vylepšování návrhů, snadnou výrobu prototypů a v neposlední řadě výrobu funkčních komponentů. Výhodou je flexibilita jak materiálů, tak tisku. Tisk je jednoduchý a bezpečný. Kromě polymerních materiálů, které jsou nejrozsáhlejší, lze použít např. kov, keramiku nebo biosklo [2]. Využití nachází v mnoha výrobních odvětvích např. v biomedicině [5; 6], leteckém průmyslu [7], farmaceutickém průmyslu [8], stavebnictví [9] a mnoho dalších.

Principem technologie (Obrázek 2) je postupné vrstvení tenkých vrstev viskózního materiálu (taveniny), vytvářející 3D objekt. Jednotlivé vrstvy se po tuhnutí spojí s vrstvou sousední. 3D objekt je vytvářen s přesností stovek mikrometrů [1]. Před samotným tiskem je důležité nastavit jeho parametry jako je procentuální výplň, styl výplně, tloušťka vrstvy, rychlost tisku, teplota apod. [10] Poloha umístění horkého vlákna je určena buď pohyblivou plošinou nebo tiskovou hlavou. Tisková hlava se typicky pohybuje v osách X a Y, modelovací deska vertikálně v ose Z. U výrobků složitějších tvarů je při tisku používán navíc podpůrný materiál, který zabrání zhroucení objektu v průběhu tisku. Tento podpůrný materiál lze po dokončení snadno odstranit. Tisk je prováděn na základě vytvořeného CAD modelu, převedeného do formátu .stl (stereo litografie) [11; 12].



Obrázek 2: Výroba pomocí taveného vlákna. Vláknový materiál je odvíjen z cívky a zaveden do tiskové hlavy, kde je roztaven a poté nanášen na tiskovou plochu. (Převzato a upraveno [10])

Metoda výroby pomocí taveného vlákna v posledních letech prošla značným pokrokem. Polymerní komponenty vyrobené touto metodou ale stále vykazují slabé a anizotropní mechanické vlastnosti v porovnání s komponenty konvenčně zpracovávanými. Je to dáno především slabými mezivrstevními vazebnými rozhraními, které vznikají během procesu nanášení vrstev. Dalším problémem mohou být nepřesná geometrická uložení a tolerance nebo chyby při tisku [1; 2].

## **Vliv parametrů tisku na výsledný objekt**

Výslednou kvalitu výrobku výrazně ovlivňuje nastavení parametrů procesu tisku. Autoři A. Elkaseer a spol. [10] se v roce 2020 zabývali právě nastavením některých parametrů a jejich vlivem na výsledné vlastnosti tisknutého objektu. Bylo zjištěno, že rozměrová přesnost je ovlivněna především tloušťkou jednotlivých vrstev a rychlostí tisku. Příliš tlusté vrstvy mají tendenci se rozprostírat. Vysoká rychlost tisku může způsobit méně přesné ukládání tištěného materiálu. Drsnost povrchu je ovlivněna úhlem sklonu povrchu a tloušťkou vrstvy.

## **2.2 Polymerní materiály používané v 3D tisku**

Dnes už mají i polymerní materiály poměrně dobré vlastnosti. V kombinaci s rychlou a levnou výrobou to přináší nesporné benefity [11]. Výrobky z polymerních materiálu lze tisknout pomocí třech různých technologií. První možností je polymerace neboli vytvrzování kapalného fotopolymeru. Dále je to metoda využívající elektronový paprsek nebo laser k tavení a spojování práškového materiálu. Poslední technologií je metoda vytlačování materiálu, kam patří metoda výroby pomocí taveného vlákna [2].

Mezi nejvíce používané polymerní materiály, které lze použít k tisku pomocí FFF patří například PLA, ABS, PET, PC (polykarbonát), TPU (termoplastický polyuretan) a Nylon. Aby byla podpořena motivace jejich využití v 3D tisku, je potřeba, aby dosahovaly podobných vlastností jako klasické materiály. Měly by být konkurenceschopné z technologického i ekonomického hlediska. Na trhu dominují především polymerní materiály, které jsou biologicky rozložitelné. PLA je biologicky odbouratelný termoplast. PET je recyklovatelný měkký polymer, který má poměrně dobré mechanické vlastnosti a je odolný proti vlhkosti a chemikáliím. ABS je termoplastický kopolymer, který má dobré mechanické vlastnosti. Nylon má skvělé mechanické vlastnosti a vysokou chemickou odolnost a odolnost proti oděru. Nevýhodou je vysoká obtížnost tisku. TPU se používá především na pružné součásti. Polykarbonát je silný materiál, který má podobné vlastnosti jako ABS, ale je náročný na tisk [13]. Materiálům ABS, PLA a PETG se budu věnovat podrobněji.

### **2.2.1 ABS**

ABS je amorfní termoplastický kopolymer. Disponuje vysokou tuhostí, houževnatostí a trvanlivostí. Je odolný jak vůči vysokému mechanickému napětí, tak vůči vysoké teplotě a je

mírně flexibilní. Díky těmto vlastnostem se využívá hlavně k tisku mechanicky namáhaných dílů jako např. LEGO kostky, kryty mobilů nebo se může využívat k tisku levných dílů využitelných ve strojírenství, které vyžadují teplotní a mechanickou odolnost. Nevýhodou je nízká odolnost vůči UV záření, kdy může docházet ke žloutnutí nebo kroucení. Zároveň je náročný na tisknutí. Tiskárna by měla být zakrytá, aby uvnitř byla udržována stabilní teplota a nehrozila deformace výrobku. Velkou nevýhodou je zdraví škodlivý zápach vznikající při tisknutí a biologická nerozložitelnost. Není bezpečný pro použití v potravinářství [11; 14].

### **2.2.2 PLA**

PLA je biologicky rozložitelný termoplast, vyrobený např. z kukuřičného škrobu nebo cukrové třtiny – je tedy šetrnější k životnímu prostředí a je toxicky nezávadný. Rozložitelný je ve speciálních průmyslových kompostárnách, kde teploty přesahují 80°C [14].

Je velice oblíbeným materiálem díky tomu, že je snadný na tisk a zároveň levný. Tiskne se při nízkých teplotách, proto není nutné tisknout s vyhřívaným podkladem. Výrobky mají vysokou tvrdost, nízkou flexibilitu a střední trvanlivost. Oproti jiným materiálům u PLA téměř nedochází ke kroucení. Nevýhodou je, že není odolný vůči vysokým teplotám a rozkládá se při vystavení UV záření. V porovnání s ostatními materiály je křehký. Používá se nejčastěji k tisku drobných dílů a rychlých prototypů, kde není vyžadována tak vysoká mechanická a teplotní odolnost. Je nevhodný pro technické a venkovní použití [11; 14].

Shabana a kolektiv se v roce 2019 zabývali vlastnostmi ABS a PLA a jejich porovnání s vzorkem tvořeným kombinací vrstev z ABS a PLA. Na základě provedených testů bylo zjištěno, že materiál PLA má vyšší maximální pevnost v tahu oproti ABS i navrstvenému vzorku z ABS a PLA. Pevnost v tlaku byla u PLA i ABS/PLA srovnatelná a vyšší oproti samotnému ABS. Vzorek kombinovaný z obou materiálu vykazoval nejlepší pevnost v ohybu, proto se nabízí využití v případě požadavku na vyšší flexibilitu. Zároveň může posloužit jako náhrada samotného ABS a snížit tak jeho nepříznivý dopad na životní prostředí [11].

### **2.2.3 PETG**

PETG je levný materiál, jednoduchý na tisknutí. Disponuje relativně vysokou houževnatostí, teplotní odolností a flexibilitou. Má dobrou přilnavost vrstev. Písmeno G v názvu znamená „glykol-modifikovaný“ – během výroby je upraven glykolem, díky kterému je oproti

klasickému PET méně křehký. Disponuje velmi malou teplotní roztažností. Je ideální k výrobě předmětů, které jsou vystavovány trvalému a náhlému stresu, např. mechanické součásti, držáky, vodotěsné díly apod. Zajímavostí je, že Prusa 3D používá PETG k tisku dílů 3D tiskáren. Lze ho využít i k tisku velkých modelů. Není však ideální k tisku drobných předmětů a detailů. Často se při tisku objevují „vlásky“, což může být právě u tisku drobných předmětů problém [14]. Základní vlastnosti vybraných polymerních materiálů jsou shrnuty v tabulce 1.

Tabulka 1: Porovnání polymerních materiálů ABS, PLA a PETG [14].

	<b>ABS</b>	<b>PLA</b>	<b>PETG</b>
<b>Teplota podložky (+/-10°C)</b>	110°C	60°C	90°C
<b>Teplota trysky</b>	240-255°C	210-215°C	230-270°C
<b>Zakrytá tiskárna</b>	Doporučeno	Ne	Ne
<b>Nevýhody</b>	- obtížný tisk - škodlivý zápach - biologicky nerozložitelný	- nízká flexibilita - křehkost - špatná odolnost	- velká přilnavost k povrchu - špatný tisk drobných předmětů
<b>Výhody</b>	+ vysoká tuhost + mechanicky odolný + trvanlivost	+ biologicky rozložitelný + snadný tisk + tvrdost + tisk drobných předmětů	+ snadný tisk + flexibilita + pevnost + přilnavost vrstev

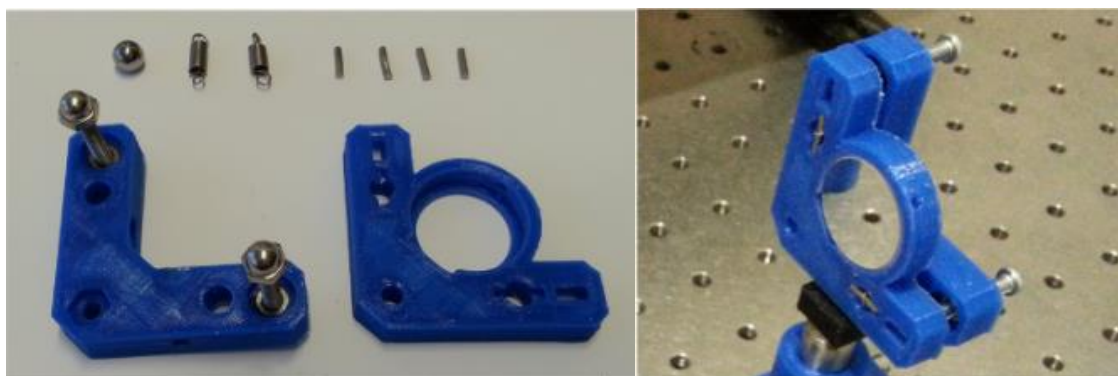
## 2.3 Využití 3D tisku v optických laboratořích

Ve volně dostupných knihovnách [15; 16] můžeme najít designy některých optomechanických komponentů určených pro 3D tisk metodou FFF. Největší výhodou volně dostupných návrhů je především možnost zkoumání, ověřování a vylepšování. Tyto komponenty lze využít v různých experimentálních uspořádáních při výuce nebo výzkumu. V kombinaci s tím, že i 3D tiskárny jsou dnes snadno cenově i uživatelsky dostupné, jsou mechanické návrhy rychleji vylepšovány a sdíleny [12; 17].

V roce 2017 Salazar-Serrano a kol. [12] navrhli a zkonstruovali několik optomechanických komponentů za cílem doplnit volně dostupnou knihovnu optických komponent pro 3D tisk. Na tiskárně Prusa-Tairona vytiskli z materiálu PLA jednotlivé díly a poté kombinovali se šrouby, maticemi, pružinami a tyčemi pro sestavení plnohodnotných optomechanických

zařízení. Mezi vyrobenými zařízeními bylo kinematické uložení (Obrázek 3) pro nastavení náklonu zrcadel a čoček a lineární posuvy (Obrázek 4), které zajišťovaly pohyb podél jedné osy. Všechny zhotovené součásti byly použity k vytvoření sestavy Michelsonova interferometru. Jejich tříbodové kinematické uložení je zkonstruováno podobně jako klasické zařízení. Dvě desky vytiskli z PLA a k sestavení použili kuličku, tažné pružinky, matice a šrouby. Jeho cena byla 12 € (305 Kč) a doba výroby 3 hodiny. Zjednodušený lineární posuv v ose Z byl sestaven ze dvou vytisknutých částí. Pohyblivá část se posouvá vůči nepohyblivé části po vodivých tyčích. Nastavení polohy v rozsahu 1 cm je řízeno šroubem M4. Bylo dosaženo poměrně stabilního a výrazného lineárního posuvu podél osy tyčí. Zařízení bylo vyrobeno během 4 hodin, z toho tisk trval 3 hodiny. Náklady na výrobu byly 33 € (840 Kč) [12].

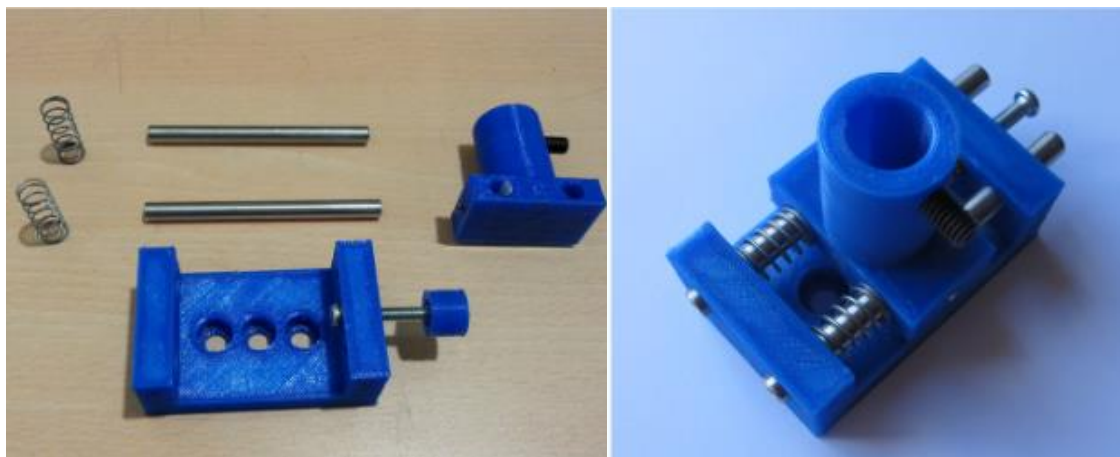
Pokud se podíváme na cenu a dobu výroby tištěných a komerčních dílů, zjistíme, že je mezi nimi značný rozdíl. Např. základní tříbodové kinematické uložení stojí podle dostupných údajů nejméně asi 35€ (890 Kč) a jeho dodání může trvat řádově mezi několika dny až několika týdny nebo měsíci v závislosti na výrobcí a vzdálenosti doručení. Oproti tomu kinematické uložení, sestavené ze dvou vytisknutých dílů a součástek, zakoupených v železářství, mělo náklady na výrobu 12€ (305 Kč) a jeho zhotovení trvalo 3 hodiny [12].



Obrázek 3: Tříbodové kinematické uložení vyrobené autory Salazar a kol. [12]. Nalevo je ukázka všech dílů potřebných k sestavení a napravo už kompletně sestavený komponent.

Autoři experimentálně ověřili funkčnost jednotlivých vyrobených komponent ve srovnání s těmi komerčně dostupnými. Sestavili optickou soustavu a laserový paprsek, který touto soustavou prošel, poté monitorovali kamerou. Provedli dvě sady měření, jedna pro 3D tištěné a druhá pro komerčně vyrobené zařízení. Zaměřili se na ověření funkčnosti kinematického

uložení, lineárního posuvu a integrační koule. Bylo zjištěno, že vyrobená zařízení dosahovala příznivých výsledků v porovnání s klasickými komerčně dostupnými zařízeními nižší třídy a jsou vhodnou alternativou pro aplikace ve výuce či výzkumu, pokud není vyžadována extrémně vysoká přesnost. Dále autoři zmiňují, že pozorovali změnu mechanických vlastností materiálu PLA, pokud byl vystaven vlhkému prostředí, proto doporučují v takovém případě použít raději materiál ABS [12].



Obrázek 4: Lineární posuvný systém v ose Z vyrobený autory Salazar a kol. [12]. Nalevo je ukázka všech dílů potřebných k sestavení a napravo už kompletně sestavený komponent.

K významným závěrům došli také SHARKEY a kol. [17] v roce 2016, kteří se zabývali zkonstruováním monolitického 3D tištěného pohyblivého stolku, schopného pohybu v rozsahu 8x8x4 mm, určeného pro mikroskopii, který vyžaduje minimální montáž po tisku a použití malého množství dalších součástí. Stolek funguje na principu kombinace pák, ohybových mechanismů a paralelogramu, díky kterým je umožněn posuv ve všech třech osách. Posuvy ve všech třech osách jsou ovládány šrouby M3, které lze ovládat pomocí vytištěných koleček nebo ozubených kol napojených na krokový motor. V mikroskopii je velice důležité přesné zaostření a umístění vzorku, proto by měl být kladen důraz na stabilitu a přesnost mechanismu [17].

Vytisknutý stolek vykazoval obstojné výsledky. Přesnost polohy se pohybovala v řádech mikrometrů. V průběhu týdenního sledování byly naměřeny výchylky maximálně 20  $\mu\text{m}$  při nestabilizované teplotě a okolních podmínkách. Autoři také uvádějí, že žádný ze zkušebních stolků nebyl po 6ti měsících používání poškozen ani v místech namáhaných ohybem. Nutno ale zmínit, že byly používány v aplikacích, kde nebyly extrémně namáhány. Díl lze použít



pro konstrukci vysoko výkonného mikroskopu, který bude mít dobrou mechanickou stabilitu pro časosběrné experimenty bez nutnosti automatického zaostřování [17].

Někteří autoři se také zabývali složitějšími systémy, kde kombinovali vytisknuté díly s kartami Arduino nebo Raspberry pi, které zajišťují snímání, ovládání a zpracovávání. Příkladem zařízení využívající 3D tisk a elektrické nebo mechanické součástky je např. vytvoření kolorimetru [18] nebo polarimetru [19] pro snímání optické aktivity látek.

### 3 Dostupné komerční optomechanické komponenty

Optické laboratoře jsou vybaveny optickými stoly, lasery, optickými a optomechanickými komponentami. Patří sem např. posuvné a rotační stupně, motorizované posuvy a kontroléry, zobrazovací systémy, optická vlákna, testovací a měřicí sady, polarizační optika, optické prvky, modulátory, ovladače apod. [20] Na optomechanické komponenty, které jsou součástí optické laboratoře jsou obvykle kladeny vysoké nároky, co se týká přesnosti a stálosti. Patří sem fixní i kinematické držáky pro různé typy optických komponent jako jsou čočky, zrcadla, hranoly, polarizátory apod. Pro příklad uvedu optomechanické komponenty, jejichž funkci budu chtít nahradit 3D tištěnými alternativami.

#### 3.1 Kinematická uložení

Kinematická uložení slouží k úhlovému natočení optických elementů podle os X a Y. Toto natočení je ovládáno pomocí dvou polohovacích šroubů. Jeden z největších distributorů optických a mechanických zařízení, firma Thorlabs [21], nabízí několik možných provedení pro optiku o průměru 7 mm, 10 mm, 1/2“, 1“ a 2“. Úhlový rozsah pohybu je  $\pm 3^\circ$ , v některých provedeních  $\pm 4^\circ$ . Nejpoužívanější je kinematické uložení pro Ø1“ optiku KM100 (Obrázek 5). Umožňuje úhlový rozsah  $\pm 4^\circ$ . Jedna otáčka polohovacího šroubu způsobí natočení o  $0,5^\circ$ . Optický element je upevněn v dutině hluboké 7 mm pomocí stavěcího šroubu s nylonovým hrotem.



Obrázek 5: Tříbodové kinematické uložení KM100 od firmy Thorlabs [21].

## 3.2 Posuvné systémy

V katalogu Thorlabsu lze opět vybrat z několika možných posuvných systémů umožňujících posuv v osách XY nebo v ose Z nebo v osách XYZ.

### Posuv Z

Lineární posuv v ose Z se používá k přesnému posunu optických elementů podél optické osy, a tím umožňuje doostření svazku. Tyto posuvy mohou být konstruovány různými způsoby. Při konstrukci, kde má být dosaženo větších posuvů, se využívají vodivé tyče a lineární ložiska. Lineární posuvy z klasických materiálů s takovou to konstrukcí obvykle stojí více než 150 €. Zde má firma Thorlabs dva zástupce. Lze je využít k upevnění optiky o průměru 1" a tloušťce až 7,1 mm nebo s využitím tubusu s externím závitem SM1 i optické elementy o menší velikosti. Posuvný systém SM1Z (Obrázek 6) lze využít i pro 30 mm klecový systém (typický pro Thorlabs). Posunutím podél tyčí v klecovém systému je dosaženo hrubého posunu. Jemný posuv je zajištěn mikrometrickým aktuátorem v krocích po 1  $\mu\text{m}$ . K zajištění upevnění optiky se zde využívají pojistné kroužky.



Obrázek 6: Optomechanický komponent umožňující lineární posuv v ose Z SM1Z od firmy Thorlabs [21].

### Posuv XY

Tyto systémy umožňují posunutí svazku v osách X a Y, tedy k osám kolmým k optické ose. Firma Thorlabs nabízí různá provedení. Pro jemné nastavení a posuvy lze použít např. CP1XY,

který umožňuje posuv  $\pm 0,25$  mm pomocí polohovacího šroubu M2,5x0,20. Středový otvor má velikost 0,35“ se závitem SM05. Ohybová konstrukce z nerezové oceli poskytuje výbornou stabilitu. Je vhodná pro využití v aplikacích pro spojování vláken nebo nastavení prostorových filtrů, u kterých je požadováno jemné umístění. Pro větší posuvy lze využít ST1XY, který lze využít v klecových sestavách. Má rozsah pohybu  $\pm 3,0$  mm a otvor o průměru 1“ pro optické elementy o tloušťce až 12,2 mm. Příkladem komponentu, který není určen pro klecový systém je LM1XY (Obrázek 7), který je také zajišťuje pro precizní nastavení. Otvor je určen pro optiku Ø1“ do tloušťky 7,5 mm. Umožňuje rozsah pohybu  $\pm 1$  mm v osách X a Y pomocí šroubu M3x0,25 mm [21].



Obrázek 7: Optomechanický komponent umožňující lineární posuv v osách X a Y LM1XY od firmy Thorlabs [21].

## 4 Polarizace světla

### 4.1 Polarizované světlo

Světlo je příčné elektromagnetické vlnění. Jeho složkami jsou vektor intenzity elektrického pole  $E$  a vektor intenzity magnetického pole  $H$ . Tyto složky jsou navzájem kolmé. Vektory  $E$  a  $H$  mají jednoznačnou orientaci, pro popsání světla se popisuje chování vektoru  $E$ . U přirozeného světla jsou směry kmitů vektoru  $E$  nahodilé a mluvíme o nepolarizovaném světle. Intenzita elektrického pole je také kolmá ke směru šíření světla, ale mění svůj směr. Pokud jsou kmity vektoru  $E$  uspořádané, jde o světlo polarizované. Kmity vektoru mohou být uspořádány různě. Pokud leží v jedné rovině, je světlo lineárně polarizované. Nebo se vektor  $E$  může v čase otáčet kolem osy šíření světla. Průmět konce vektoru  $E$  do roviny kolmé na směr šíření může buď opisovat elipsu, v tom případě jde o elipticky polarizované světlo, nebo opisuje kružnici a v tom případě mluvíme o kruhově polarizovaném světle. Směr otáčení pak určuje, zda se jedná o pravotočivé nebo levotočivé elipticky (kruhově) polarizované světlo [22].

### Snellův zákon

Pokud dopadá rovinná vlna na rozhraní dvou prostředí s různým indexem lomu, dojde k odrazu, popřípadě i k lomu paprsku. Odražený paprsek se odráží pod stejným úhlem jako dopadající. Pro lomenou vlnu platí Snellův zákon neboli zákon lomu [23]

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2, \quad (4.1)$$

kde  $n_1$  je index lomu prvního prostředí,  $n_2$  je index lomu druhého prostředí,  $\alpha_1$  je úhel dopadu (zároveň i odrazu) a  $\alpha_2$  je úhel lomu.

Zásadním objevem v historii polarizace světla přispěl v roce 1670 Bartholinus. Objevil, že pokud nechá dopadat paprsek přirozeného světla na vápencový anizotropní krystal, po průchodu dojde k jeho rozdělení na ordinární a extraordinární paprsek. Protože se oba paprsky lámou po dopadu na krystal pod jiným úhlem, začalo se tomuto krystalu říkat dvojlomný. Oba paprsky vyhovují Snellovu zákonu, rozdílem je různý index lomu [24].

K dalšímu významnému objevu dospěl Huygens. Použil druhý krystal jako analyzátor. Zjistil, že při jeho otáčení se různě mění intenzity obou paprsků. Když nechal druhý krystal ve stejné

poloze jako první, došlo k tomu, že první paprsek měl maximální intenzitu, zatímco druhý měl nulovou. Ve chvíli, kdy krystal pootočil o  $90^\circ$  měl maximální intenzitu druhý paprsek a první paprsek nulovou. Paprsek přirozeného světla se tedy skládá ze dvou nezávislých navzájem kolmo polarizovaných stavů pojmenovaných jako s a p-polarizace. Směr s je kolmý na rovinu dopadu a směr p je s ní rovnoběžný [24].

### Malusův zákon

Do začátku 19. století byl stále jediný způsob, jak generovat polarizované světlo, pomocí dvojlomného krystalu. Až v roce 1808 objevil Malus, že polarizované světlo lze získat i pomocí odrazu přirozeně dopadajícího světla na skleněné destičce. Sledoval odražený paprsek přes krystal a zjistil, že při dopadu světla pod úhlem asi  $57^\circ$  mizí. Po pootočení krystalu intenzita paprsku postupně dosahovala maxima a minima. Na základě tohoto objevu stanovil vztah pro intenzitu polarizovaného světla, který je dnes znám jako Malusův zákon (Obrázek 8) a platí pro lineárně polarizované světlo a lineární polarizátor. Pokud dopadá na lineární polarizátor lineárně polarizovaná vlna, která má intenzitu  $I_0$  a osu polarizace vůči polarizátoru natočenou o úhel  $\theta$ , pak pro intenzitu vlny  $I(\theta)$  prošlou polarizátorem platí [24; 23]

$$I(\theta) = I_0 \cos^2 \theta. \quad (4.2)$$

### Brewsterův zákon

Brewster na začátku 19. století také zkoumal odražené polarizované světlo. V roce 1812 objevil, že při některých úhlech dopadu na skleněnou destičku dochází k tomu, že p-polarizaci vůbec nelze detekovat. Zároveň při otočení krystalu o  $90^\circ$  odražený paprsek mizí. Dále přišel na souvislost mezi prošlým a odraženým paprskem. Při výpočtech vycházel ze Snellova zákona a stanovil, že pokud prošlý a odražený paprsek mezi sebou svírají  $90^\circ$ , je odražený paprsek plně polarizovaný ve směru s.

Pro Brewsterův úhel platí:

$$\tan \alpha_B = \frac{n_2}{n_1}. \quad (4.3)$$



Obrázek 8: Malusův zákon vyjadřující závislost intenzity lineárně polarizovaného světla na úhlu natočení polarizátoru.

### Fresnelova vlnová teorie

Díky Fresnelově vlnové teorii byly zcela vysvětleny tři známé jevy – interference, difrakce a polarizace. Dokázal, že světelné pole se skládá ze dvou ortogonálních částí, které jsou kolmé na směr šíření světla,  $u_1(r, t)$  a  $u_2(r, t)$ . Popsal je dvěma vlnovými rovnicemi:

$$\nabla^2 E_x(r, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_x(r, t)}{\partial t^2} \quad (4.4)$$

$$\nabla^2 E_y(r, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_y(r, t)}{\partial t^2}, \quad (4.5)$$

$E_x(r, t)$  a  $E_y(r, t)$  jsou komponenty optického pole a popisují sinusové oscilace v rovinách x-z a y-z,  $r$  je poloměr vektoru vzhledem k bodu v prostoru,  $t$  – čas,  $\nabla^2$ - Laplaceův operátor,  $k$  – vlnový vektor. Řešením vlnových rovnic je:

$$E_x(r, t) = E_{0x} \cos(\omega t - k \cdot r + \delta_x) \quad (4.6)$$

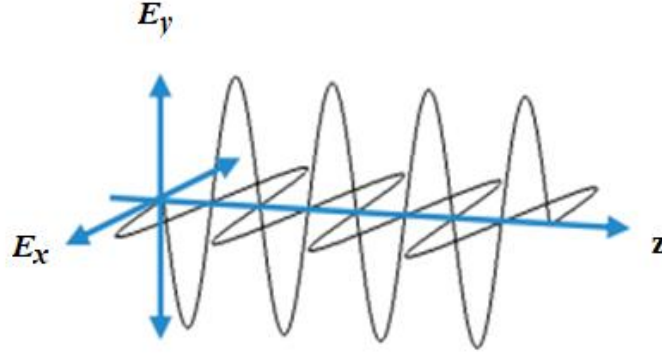
$$E_y(r, t) = E_{0y} \cos(\omega t - k \cdot r + \delta_y), \quad (4.7)$$

kde  $E_{0x}$  a  $E_{0y}$  jsou amplitudy optické vlny, veličiny  $\delta_x$  a  $\delta_y$  charakterizující fázi,  $\omega$  je úhlová frekvence a platí:

$$\omega = 2\pi f \quad (4.8)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (4.9)$$

výraz  $\omega t - kr$  se nazývá propagátor vlny, který popisuje polohu koncového bodu vektoru elektrické intenzity [24]. Na obrázku 9 je grafická reprezentace komponentů  $E_x$  a  $E_y$ .



Obrázek 9: Grafická reprezentace komponentů  $E_x$  a  $E_y$  polarizovaného světla. Převzato a upraveno z [24].

V praxi se většinou uvažuje směr šíření ve směru osy  $z$ :

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x) \quad (4.10)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta_y). \quad (4.11)$$

Takto jsou vyjádřeny vektory intenzity elektrického pole dvou ortogonálních lineárně polarizovaných harmonických vln. Z poměru amplitud  $E_{0x}$ ,  $E_{0y}$  a počátečních fází  $\delta_x, \delta_y$  lze rozeznat 3 druhy polarizace – lineární, kruhová a eliptická (Obrázek 10) [22; 24].

#### 4.1.1 Eliptická polarizace

Rovnice pro polarizační elipsu vychází z rovnic pro  $E_x(z, t)$  a  $E_y(z, t)$  a vyloučením parametru  $\omega t - kr$ :

$$\frac{E_x(z, t)^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y(z, t)^2}{E_{0y}^2} - \frac{2E_x(z, t)E_y(z, t)}{E_{0x}E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta, \quad (4.12)$$



kde rozdíl fází  $\delta = \delta_y - \delta_x$ .

Obecně je světelné pole elipticky polarizované, ale může nastat několik speciálních kombinací amplitudy a fáze, při kterých dostáváme kruhově polarizované nebo lineárně polarizované světlo [24].

#### 4.1.2 Kruhová polarizace

Kruhová polarizace je zvláštní případ eliptické polarizace. Platí při ní, že amplitudy si jsou rovny  $E_{0x} = E_{0y}$ . Pokud je  $\delta = \frac{\pi}{2}$  nebo  $\delta = -\frac{\pi}{2}$  jde o světlo pravotočivě resp. levotočivě kruhově polarizované [24]. Rovnice pro kruhovou polarizaci se zjednoduší:

$$\frac{E_x(z, t)^2}{E_0^2} + \frac{E_y(z, t)^2}{E_0^2} = 1 \quad (4.13)$$

#### 4.1.3 Lineární polarizace

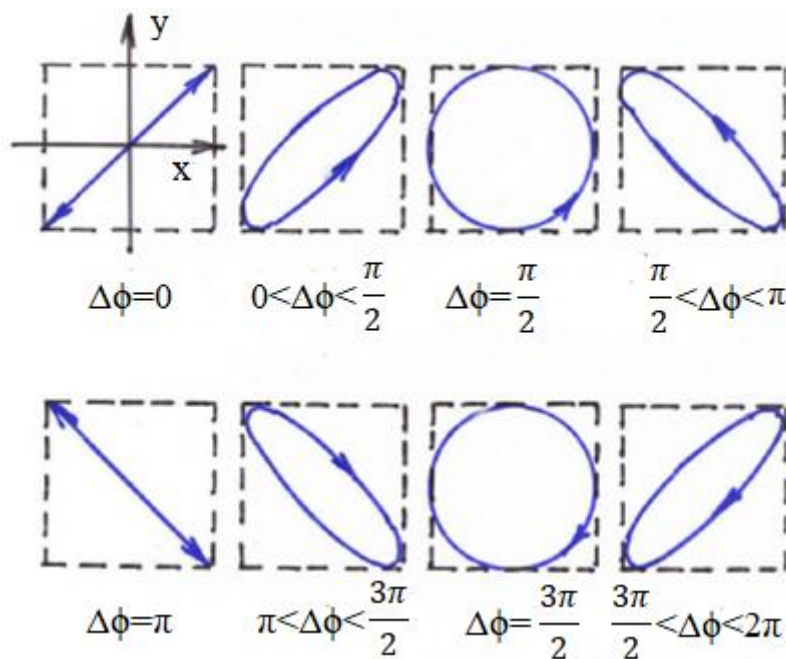
Je-li  $\delta = 0$  je světlo lineárně polarizované ve směru  $+45^\circ$ . Když  $\delta = \pi$  je světlo lineárně polarizované v  $-45^\circ$ . V případě, že je jedna ze složek rovna 0 je světlo polarizované ve směru kolmé složky. Tedy pokud platí  $E_{0y} = 0$  nebo  $E_{0x} = 0$  jde o lineárně horizontálně resp. vertikálně polarizované světlo [24].

### 4.2 Polarizátory

Polarizátory jsou optické prvky, které s využitím odrazu, lomu nebo absorpce přetvářejí přirozené světlo na částečně nebo zcela polarizované světlo. Poměrem intenzity polarizované částí světla ku intenzitě přirozeného světla můžeme vyjádřit stupeň polarizace:

$$SP = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \quad (4.14)$$

$I_{max}$  a  $I_{min}$  jsou intenzity zkoumaného světla. Lze je nalézt otáčením polarizátoru, konkrétně je mezi těmito dvěma hodnotami rozdíl pootočení osy propustnosti o  $\pi/2$  [22].



Obrázek 10: Typ polarizace na základě dráhového rozdílu. Převzato a upraveno z [22].

### 4.3 Maticový popis stavu polarizace světelných vln pomocí Jonesových vektorů

Maticová formulace, která se skládá z Jonesových vektorů a Jonesových matic, díky kterým lze popsat komponenty polarizace. Výhodou této formulace je její jednoduchost oproti jiným (např. Mullerův přístup). Nevýhodou je ale to, že ji lze použít pouze pro plně polarizované světlo. Využití maticového popisu pomocí Jonesových vektorů je především určování intenzity výstupního svazku po průchodu polarizačním prvkem. R. C. Jones využil tento maticový výpočet k popisu stavu polarizace v roce 1941 [24; 22].

Libovolnou rovinnou vlnu lze vyjádřit jako superpozici dvou ortogonálních lineárně polarizovaných vln [22].

$$E(z, t) = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x) + E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta_y) \quad (4.15)$$

Ve vyjádření pomocí komplexních funkcí:

$$E(z, t) = (E_{0x} + E_{0y})e^{i(\omega t - kz)}, \quad (4.16)$$

kde  $E_x$  a  $E_y$  jsou komplexní amplitudy, které lze vyjádřit podle jejich velikostí a fází:

$$E_x = E_{0x}e^{i\delta_x} \quad (4.17)$$

$$E_y = E_{0y}e^{i\delta_y}, \quad (4.18)$$

Stav polarizace lze vyjádřit Jonesovým vektorem:

$$E = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x}e^{i\delta_x} \\ E_{0y}e^{i\delta_y} \end{pmatrix}. \quad (4.19)$$

Aplikujeme rozdíl fází  $\delta = \delta_y - \delta_x$  a zavedeme úhel  $\alpha$  definovaný:

$$\tan \alpha = \frac{E_{0y}}{E_{0x}}. \quad (4.20)$$

Potom získáme Jonesův vektor ve tvaru:

$$E = \sqrt{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} e^{i\delta_x} \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ e^{i\delta} \sin \alpha \end{pmatrix}, \quad (4.21)$$

který popisuje obecnou elipticky polarizovanou vlnu. Ve většině aplikací nejsou vyžadovány přesné hodnoty amplitud a fází. Zjednodušuje se vyjadřování stavu polarizace normovanými tvary Jonesových vektorů tak, že  $E_{0x}^2 + E_{0y}^2 = 1$  a  $\delta_x = 0$  [22].

Polarizační efekt optické soustavy nebo jejího prvku lze popsat Jonesovou maticí

$$J = \begin{pmatrix} j_{xx} & j_{xy} \\ j_{yx} & j_{yy} \end{pmatrix}. \quad (4.22)$$

Slouží k popsání vztahu mezi vstupní a výstupní vlnou

$$E' = J \cdot E, \quad (4.23)$$

kde  $E'$  a  $E$  jsou Jonesovy vektory, které popisují vstupní a výstupní vlnu příslušným stavem polarizace.

Pro celkovou intenzitu platí [24].

$$I = E_x E_x^* + E_y E_y^* = |E_x|^2 + |E_y|^2 \quad (4.24)$$

## Transformace souřadnic

Po pootočení soustavy lze vyjádřit vektor v maticovém vyjádření:

$$\begin{pmatrix} E_{x'} \\ E_{y'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x \cos \vartheta + E_y \sin \vartheta \\ -E_x \sin \vartheta + E_y \cos \vartheta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}. \quad (4.25)$$

Transformace souřadnic je naznačena na obrázku 11. Pro transformační matici, která se používá při popisu jevů stáčení roviny polarizace platí:

$$T(\vartheta) = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix}. \quad (4.26)$$

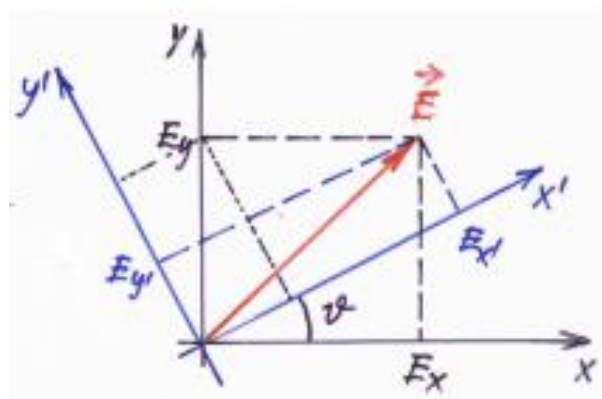
Toho využijeme k popisu rotačního polarizátoru, což je optická soustava, která stáčí rovinu polarizace o úhel  $\vartheta$ :

$$T(-\vartheta) \cdot J \cdot T(\vartheta) = J(\vartheta). \quad (4.27)$$

Pokud předpokládáme ideální lineární polarizátor s osou propustnosti rovnoběžnou s osou  $x$ , můžeme ho vyjádřit Jonesovou maticí:

$$J = \begin{pmatrix} j_{xx} & j_{xy} \\ j_{yx} & j_{yy} \end{pmatrix}. \quad (4.28)$$

$$J(0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$



Obrázek 11: Nákres transformace souřadnic. Převzato z [22].

Poté s využitím transformační matice můžeme vyjádřit Jonesovu matici pro lineární polarizátor s osou propustnosti svírající s osou  $x$  úhel  $\vartheta$ :

$$J(\vartheta) = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \vartheta & \sin \vartheta \cos \vartheta \\ \sin \vartheta \cos \vartheta & \sin^2 \vartheta \end{pmatrix}.$$

Působení polarizátoru na lineárně polarizovanou vlnu lze popsat [22]:

$$\begin{pmatrix} E_{x'} \\ E_{y'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \vartheta & \sin \vartheta \cos \vartheta \\ \sin \vartheta \cos \vartheta & \sin^2 \vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}. \quad (4.29)$$



## 5 Motivace a cíle práce

Nové technologie umožňují zkrátit vývojový cyklus nových zařízení. S využitím 3D tiskáren lze vytvořit prototypy drobnějších součástek v řádu jednotek hodin. 3D tisk optomechanických zařízení a komponentů je v posledních letech už několikrát zpracované téma. Stále jsou k sestavení funkčních zařízení potřeba klasické součástky jako pružinky, tyče, šrouby apod. Cílem této diplomové práce je návrh designu komponentů, které budou funkční s využitím co nejmenšího počtu dalších součástek a budou u nich zohledněny a využity vlastnosti polymerních materiálů. Nelze předpokládat, že zařízení sestavená z 3D tištěných komponentů budou dosahovat stejných výsledků a vlastností jako ty komerčně vyráběné. Vytvořené komponenty budou nacházet uplatnění ve výuce nebo aplikacích, které nevyžadují vysokou přesnost.

Cílem je zvládnutí technologie, návrh a výroba statických i pohyblivých optomechanických komponentů určených pro optickou laboratoř. Experimentálně bude ověřena jejich funkce a časová stálost a stabilita. Komponenty budou porovnávány s komerčně dostupnými prvky vyrobenými z kovu (hliníkové slitiny, ocel). Dále bude vytvořen komplexní mechanismus zahrnující mechanické i elektrické součástky, které budou vhodně kombinovány s částmi vzniklými 3D tiskem. Návrh a zhotovení bude kompletní – mechanický návrh, výroba, sesazení a elektrické zapojení včetně základního software pro ovládání, vyčítání parametrů a zobrazení naměřených dat ve vhodné reprezentaci.

1. Rešerše materiálů a technik pro 3D tisk.
2. Návrh a výroba statických i pohyblivých mechanismů.
3. Návrh řízení a příprava základního software k ovládání mechanismu.
4. Ověření funkčnosti polymerových zařízení a jejich srovnání s komerčně dostupnými kovovými alternativami.





## 6 Návrhy a výroba optomechanických komponentů

S využitím 3D tisku jsem vytvořila několik základních optomechanických komponentů, které jsou často využívány v optických laboratořích – statický držák, tříbodové kinematické uložení, lineární posuv v ose Z a lineární posuv v osách XY. Statický držák byl vytisknut na tiskárně Zortrax M300 [25] z materiálu ABS. Ostatní komponenty byly vytisknuty na tiskárně Prusa Mini [14] z materiálů PLA a PETG.

Proces výroby zahrnoval:

1. Vytvoření 3D modelu a exportování do formátu .stl
2. Vložení do příslušného software a nastavení tisku
3. Vygenerování G-Code a přenesení do 3D tiskárny
4. Tisk
5. Závěrečné úpravy

3D modely byly vytvořeny v programu SolidWorks a exportovány do formátu .stl (stereolitografie). Následně bylo zapotřebí převést návrhy pomocí software (např. Prusa slicer) do příslušného formátu obsahující pokyny pro tisk. Komponenty byly vytisknuty metodou výroby pomocí taveného vlákna z materiálů ABS, PLA nebo PETG. Pokud byl díl moc složitý nebo obsahoval převísle části, využívaly se při tisku podpěry. Tiskárny, které jsem pro tisk používala vytvářely podpěry ze stejného materiálu, jako byl samotný výrobek. Jednotlivé vrstvy podpěr měly řidší strukturu a po tisku je bylo možné snadno odstranit.

Některé vyrobené díly bylo nutné po tisku upravit, odstranit případné tenké vlásky materiálu, které se při tisku mohou vytvářet (speciálně u materiálu PETG) a vyříznout závity v otvorech pro polohovací šrouby a pro upevnění komponentu. Následně byly vytvořeny s využitím klasických součástek – šroubů a matic, funkční optomechanické komponenty.

## 6.1 Specifikace 3D tištěných polymerních dílů

### 6.1.1 Smršťování

Jedním z parametrů, která je potřeba zohlednit je smršťování. Při tisku metodou FFF nelze vždy docílit zcela stejných parametrů jako je vytvořený návrh. Pro ověření jsem vytvořila kalibrační destičku s několika otvory a válečky o průměrech od 1 do 10 mm. Z výsledků (Tabulka 2) je patrné, že míra smrštění není příliš ovlivněna velikostí objektu a ani zde není vidět přímá úměrnost. Co se týče materiálu PLA, průměrné procentuální zmenšení válců (vnějších rozměrů) je 1,075 %. Oproti tomu u PETG je tato změna menší, a to průměrně o 0,662 %. U otvorů (vnitřních rozměrů) jde u materiálu PLA o zmenšení o 2,639 %, zatímco u PETG je to 2,933 %. Lze tedy říct, že u otvorů dochází ke větší změně oproti požadované velikosti.

Tabulka 2: Test smrštění u materiálu PLA a PETG.

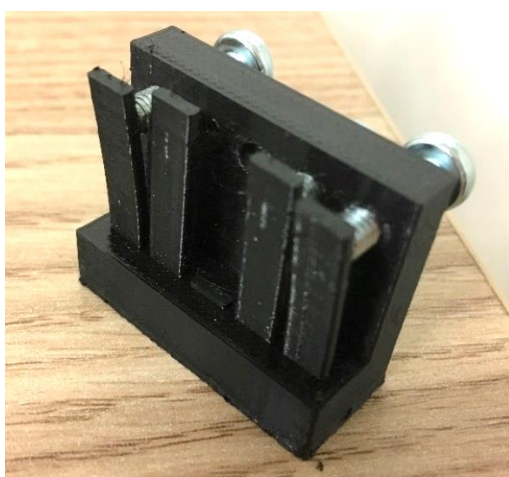
	Válec				Díra			
Požadovaný průměr [mm]	PLA		PETG		PLA		PETG	
	Průměr po tisku	[%]	Průměr po tisku	[%]	Průměr po tisku	[%]	Průměr po tisku	[%]
1	0,98	2,041	0,99	1,01				
2	1,97	1,523	1,98	1,01	1,91	4,712	1,96	2,041
3	2,97	1,010	2,98	0,671	2,86	4,895	2,85	5,263
4	3,98	0,503	3,99	0,251	3,9	2,564	3,8	5,263
5	4,97	0,604	4,96	0,806	4,92	1,626	4,9	2,041
6	5,94	1,010	5,96	0,671	5,88	2,041	5,84	2,74
7	6,9	1,449	6,92	1,156	6,82	2,639	6,83	2,489
8	7,9	1,266	7,95	0,629	7,84	2,041	7,84	2,041
9	8,97	0,334	8,99	0,111	8,84	1,810	8,8	2,273
10	9,9	1,010	9,97	0,301	9,86	1,420	9,78	2,249
<b>Průměr</b>	<b>1,075 %</b>		<b>0,662 %</b>		<b>2,639 %</b>		<b>2,933 %</b>	

### 6.1.2 Pružnost

Jednou z výhod polymerních materiálů, kterou jsem při svých návrzích využila je jejich ohebnost a pružnost. Při výrobě jsem si ověřila, že jsou materiály PLA i PETG poměrně pružné. Pro dosažení co největší přesnosti funkce vyrobených komponentů by bylo potřeba, aby se pružné části po vychýlení vrátily zpět do původní polohy. Vytvořila jsem vzorek pro testování plasticity použitých materiálů (Obrázek 12) s několika tenkými destičkami, které jsem pomocí šroubů vychýlila o různou vzdálenost z původní polohy a po 24 hodinách jsem šrouby uvolnila a změřila v jaké poloze se jednotlivé destičky nachází. Původní mezera mezi hlavní deskou, kde byly otvory pro šrouby a tenkými destičkami před testem byla 3 mm. Tenké destičky jsem vychýlila o 1, 2 a 3 mm s tím, že tato mezera byla měřena v nejvyšším bodě. Testovány byly materiály PLA a PETG.

Tabulka 3: Test pružnosti a plasticity materiálů PETG a PLA.

PETG		PLA	
Velikost vychýlení [mm]	Velikost mezery po testu [mm]	Velikost vychýlení [mm]	Velikost mezery po testu [mm]
0	3	0	3
1	3,4	1	3,3
2	3,7	2	3,75
3	4	3	4,1



Obrázek 12: Testovací vzorek pro testování plasticity a pružnosti u materiálu PETG.

Zjistila jsem (Tabulka 3), že i malé vychýlení z polohy způsobí, že se destička nevrátí zcela do původní polohy, s čímž je tedy u vyrobených komponentů potřeba počítat. Zároveň zde nejsou velké rozdíly mezi oběma materiály.

## 6.2 Nastavení tisku

Na tiskárně Original Prusa Mini+ (Obrázek 13) byly z materiálů PLA a PETG vytisknuty všechny pohyblivé optomechanické komponenty a potřebné součástky. Cena této tiskárny je momentálně 10 990 Kč, ceny používaných filamentů jsou 599 Kč/kg za Prusament PLA a 699 Kč/kg za Prusament PETG [14]. Základní parametry při nastavení tisku jsou vypsány v tabulce 4. Toto nastavení je zároveň doporučováno výrobcem.

Tabulka 4: Nastavení tisku na tiskárně Prusa Mini+ pro materiály PLA a PETG.

	Výplň	Výška vrstvy [mm]	Výška 1.vrstvy [mm]	Vzor výplně
PETG	20%	0,15	0,2	gyroid
PLA	20%	0,15	0,2	gyroid
	Teplota trysky	Teplota podložky	Podpěry	
PETG	230°C	85°C	Pouze u některých dílů	
PLA	215°C	60°C	Pouze u některých dílů	



Obrázek 13: Tiskárna Original Prusa Mini+ od firmy Prusa Research.

### 6.3 Statický držák

Nepohyblivý držák na optické elementy byl vytisknut z materiálu ABS. Materiál ABS byl využit, protože je mechanicky odolný a má vysokou trvanlivost. Je vhodný k tisku fixních komponentů, které nevyžadují flexibilitu. Návrh (Obrázek 14) byl vytvořen na základě držáku FMP1/M od firmy Thorlabs [21]. Základní nastavení tisku je vypsáno v tabulce 5.



Obrázek 14: Vytvořený návrh statického držáku na optické elementy.

Tabulka 5: Nastavení tisku držáku z materiálu ABS na tiskárně Zortrax.

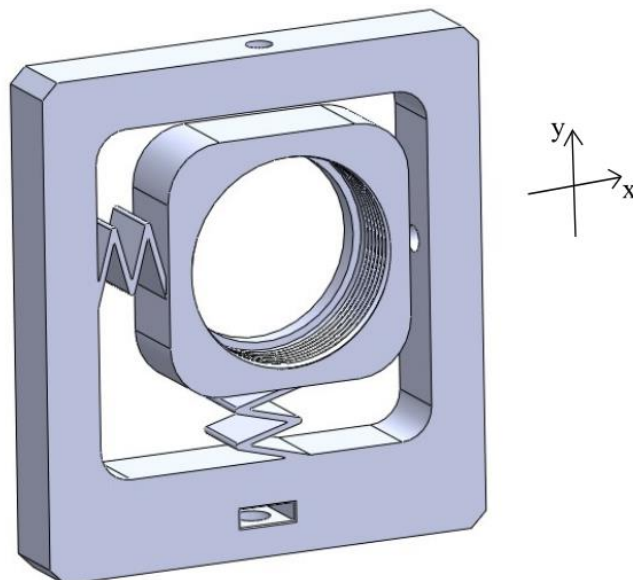
Materiál	Výška vrstvy [mm]	Teplota podložky [°C]	
ABS	0,14	90	
Teplota trysky [°C]	Tvar výplně	Cena dílu [Kč]	Doba tisku
265	Gyroid	1,42	20m

### 6.4 Lineární posuv XY

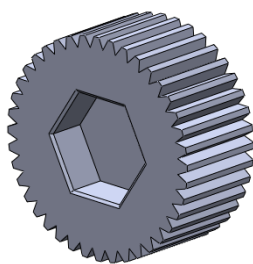
Tyto optomechanické komponenty mohou být konstruovány více způsoby v závislosti na požadovaném rozsahu, přesnosti apod. Mnou vytvořený návrh (Obrázek 15) je zkonstruován jako jeden díl. Vnitřní část s otvorem pro umístění optického elementu je dvěma pružinkami ve tvaru písmene W spojena s vnějším rámem. V otvoru vnitřní části komponentu je vytvořen závit a optický element je do ní uchycen s využitím rovněž vytištěného závitového kroužku. Ve vnějším rámu je díra na upevnění komponentu k optickému pilíři a dvě díry pro šrouby M4 sloužícími k ovládání posunu. V návrhu jsou tyto díry modelovány hladké s rozměrem 3,3 mm, což odpovídá malému průměru závitu M4 s ohledem na smrštění během tisku. Po vytisknutí je

potřeba závitníkem vyříznout závit. Oproti tomu díra na upevnění komponentu má větší průměr a místo závitu je využita čtyřhranná matice M4, která se po tisku vloží do přesného obdélníkového otvoru.

Komponent byl vytisknut z materiálu PLA i PETG za účelem porovnání jejich vlastností. Zároveň jsem testovala i časovou stálost při nastavení v určité poloze.



Obrázek 15: Vytvořený 3D model optomechanického komponentu pro lineární posuv v osách X a Y.



Obrázek 16: Válcové hlavy na šrouby M4 s šestihrannou hlavou.

Aby byla zajištěna snadnější manipulace se šrouby, vytvořila jsem válcové hlavy s šestihranným zahloubením, které jsem po vytisknutí nalisovala na používané šrouby s šestihrannou hlavou M4 (obrázek 16) a M6. Jsou vytisknuty z materiálu PETG. Po obvodu jsou vytvořeny drobné zářezy, aby byla manipulace co nejjednodušší. Jsou použity u všech vyrobených komponentů.

Tabulka 6: Seznam použitých součástek a cena tisku u vyrobeného lineárního posuvu XY. V tabulce jsou zobrazeny dvě varianty - PLA i PETG.

Použité díly		Čas tisku	Počet	Cena [Kč]
<b>Tisknuté</b>	Základní díl, a) PLA	1h54m	1	9,16
	b) PETG	1h56m	1	10,95
	Válcové hlavy na šrouby M4, PETG	27m	2	1,72
	Závitový kroužek, PLA	10m	1	0,62
<b>Koupené</b>	Matice čtvercová M4 ČSN 021416		1	0,46
	Šroub s šestihrannou hlavou M4 ČSN 021103		2	1,10
<b>Celková doba výroby, PLA</b>				<b>3,5hod</b>
<b>Celková doba výroby, PETG</b>				<b>3,5hod</b>
<b>Celková cena PLA</b>				<b>13,06 Kč</b>
<b>Celková cena PETG</b>				<b>14,85 Kč</b>

## 6.5 Tříbodové kinematické uložení

Kinematické uložení zajišťuje ovládání sklonu upevněného optického elementu. Standardně jsou využívány dva díly. V jednom je umístěna čočka a druhý je upevněn k optickému pilíři. Jejich vzájemná přesná poloha vůči sobě je zajištěná kuličkou, tažnými pružinami a dvěma polohovacími šrouby. Můj návrh kinematického uložení (Obrázek 17) je vytvořen tak, aby bylo použito co nejméně dalších součástek a s cílem zjistit, zda lze klasické pružinky nahradit vytisknutými. Je použit pouze šroub M4 s šestihrannou hlavou k upevnění optického elementu, dva šrouby M6 se stoupáním 1,0 určené k polohování a čtvercová matice M4. Matice slouží k zajištění stabilního upevnění komponentu k optickému pilíři. Pružinky, které mají tvar písmene V, byly vytisknuty spolu s oběma hlavními deskami, čímž je využita flexibilita plastových materiálů. V obou hlavních deskách je vytvořen otvor. Zařízení lze použít jak pro zrcátka, tak pro čočky. Kruhový otvor pro optiku v desce je hladký a zakončený hranou, o kterou se optický element opře. Upevnění optického elementu je zprostředkováno pomocí šroubu M4. Tento princip upevnění je využit i u lineárních posuvných systémů v ose Z.

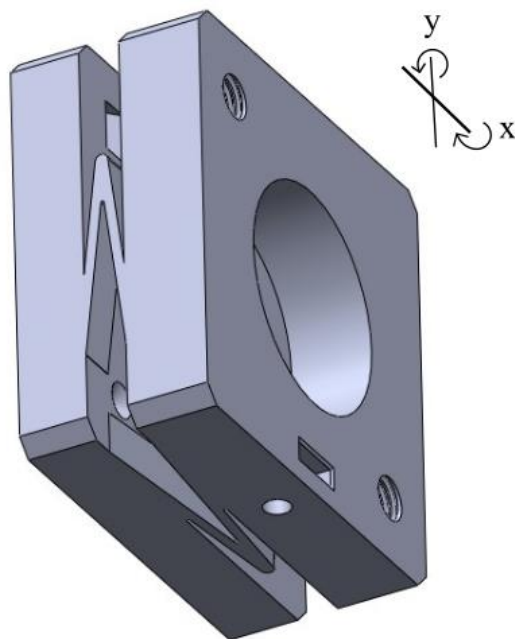
U tříbodového kinematického uložení je důležité, aby bylo dosaženo správného odebrání stupňů volnosti a umožnění natočení pouze podle os X a Y. Naproti jednomu z otvorů se závitem M6 je v desce vytvořeno podlouhlé zahloubení, které má v příčném řezu tvar trojúhelníku. V rohu mezi pružinami je díra tvaru kuželu. Místo klasické kuličky jsem vytvořila váleček s kulovou plochou, který se umístí mezi desky a kulovou plochou zapadne do kuželového mělkého zahloubení. Konce šroubů M6 jsem obrousila na pásové brusce, aby měly rovněž kulovou plochu. Komponent byl vytisknut z materiálu PLA.

Navrhnuté kinematické uložení bylo vytisknuto za 3 hodiny a 10 minut. Celková doba výroby, která zahrnuje i vytvoření návrhu v programu Solidworks a závěrečnou úpravu je asi 5 hodin. Náklady na výrobu kinematickou uložení byly 26,93 Kč. Čas a cena výroby jednotlivých dílů jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7: Seznam použitých součástí k výrobě tříbodového kinematického uložení a jejich ceny.

	<b>Použité díly</b>	<b>Čas tisku</b>	<b>Počet</b>	<b>Cena [Kč]</b>
<b>Tisknuté</b>	Základní díl, PLA	3h10m	1	22,67
	Válcové hlavy na šrouby M4, PETG	15m	1	0,86
	Válcové hlavy na šrouby M6, PETG	16m	2	0,79
	Váleček s kulovou plochou, PLA	5m	1	0,22
<b>Koupené</b>	Matice čtvercová M4 ČSN 021416		1	0,46
	Šroub s šestihrannou hlavou M4 ČSN 021103		1	0,55
	Šroub s šestihrannou hlavou M6 ČSN 021103		2	1,38
<b>Celková cena</b>				<b>26,93 Kč</b>
<b>Celková doba výroby</b>				<b>5hod</b>



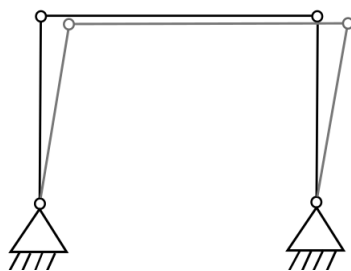


Obrázek 17: Vytvořený 3D model tříbodového kinematického uložení.

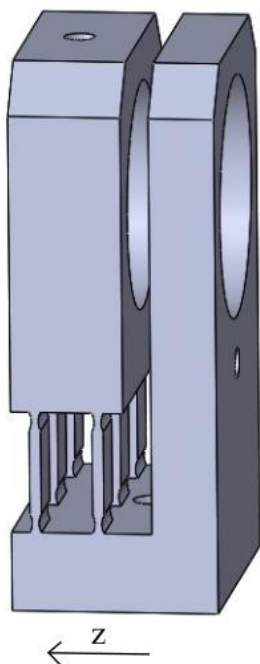
## 6.6 Lineární posuv Z

Lineární posuvný systém v ose Z se používá k posunu optických elementů podél optické osy. Vytvořený návrh (Obrázek 19) funguje na principu paralelogramu. Základní rám s podstavou se připevní k optickému pilíři. Je v něm kruhový otvor o velikosti 26 mm na průchod paprsků a díra velikosti 3,3 mm pro vytvoření závitu M4. Na základní podstavě jsou ve dvou paralelních řadách vždy 3 a 3 úzké destičky na kterých je rám pro upevnění optického elementu. U spojení destiček k podstavě a k rámu je kulové zaoblení. Tloušťka napojení je optimalizována tak, aby mohlo docházet k potřebnému ohybu a posunutí, ale aby nedošlo k přílišnému namáhání a zlomení. Šroub M4, který zajišťuje posunutí je umístěn pod otvorem pro průchod paprsků. Pokud by byl umístěn v horní části, docházelo by i k nechtěnému naklonění. Využití paralelogramu má nevýhodu v tom, že při vyosení dojde i k posunutí elementu v ose Y (Obrázek 18). Pokud budeme předpokládat, že vytvořený lineární posuv bude vykonávat posun maximálně 2 mm, znamenalo by to výškové posunutí 0,15 mm.

Celková cena navrhnutého lineární posuvu v ose Z byla 11,94 Kč a celková doba výroby asi 4 hodiny. Čas a cena výroby jednotlivých dílů jsou uvedeny v tabulce 8.



Obrázek 18: Princip paralelogramu



Obrázek 19: Vytvořený 3D model komponentu umožňující lineární posuv v ose Z, využívající principu paralelogramu.

Tabulka 8: Seznam použitých součástek k výrobě lineárního posuvného systému v ose Z využívajícího principu paralelogramu a jejich ceny.

Použité díly		Čas tisku	Počet	Cena [Kč]
Tisknuté	Základní díl, PLA	2h32m	1	10,05
	Válcové hlavy na šrouby M4, PETG	15m	1	0,86
Koupené	Matice čtvercová M4 ČSN 021416		1	0,48
	Šroub s šestihrannou hlavou M4 ČSN 021103		2	1,10
Celková cena				12,49 Kč
Celková doba výroby				4hod

## 7 Ověření funkčnosti optomechanických komponentů

Po vytisknutí všech dílů a sestavení funkčních komponentů jsem ověřila jejich funkci. Zprv bylo potřeba zjistit jakých posuvů lze dosáhnout a jak přesná tyto zařízení budou. Dále bylo potřeba vyzkoušet, jaká je opakovatelnost a jestli pružné části dílů nebudou v průběhu používání ztrácet požadované vlastnosti. Vždy jsem naměřila dvě sady měření, mezi kterými jsem komponent nechávala v libovolné nastavené pozici v rámci desítek minut a poté je nastavila zpět do základní polohy a provedla 2. měření. Otestovala jsem tak stálost a opakovatelnost. Pro testování jsem vždy sestavila jednoduchou optickou soustavu a zaznamenávala procházející paprsek na čip kamery Basler ACA2040-90um. Tato kamera má velikost čipu 11,3 mm x 11,3 mm a velikost jednoho pixelu 5,5  $\mu\text{m}$  x 5,5  $\mu\text{m}$ . Jako zdroj světla byl použit přenosný laserový modul o vlnové délce 532 nm.

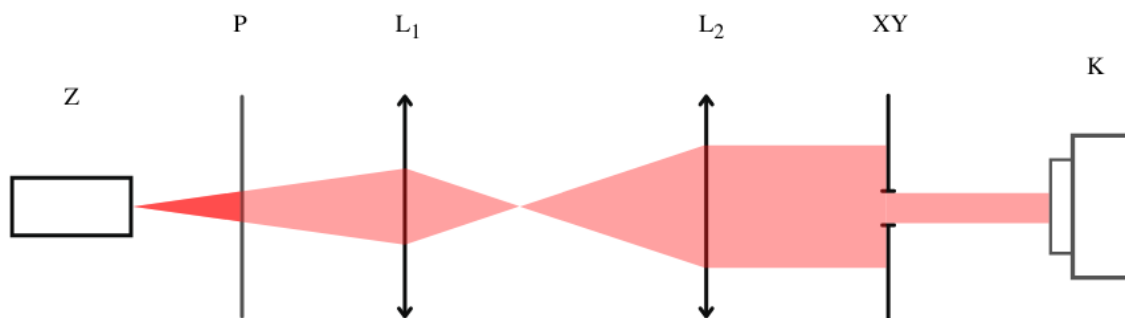
### 7.1 Testování vyrobených polymerních komponentů

#### Posuv XY

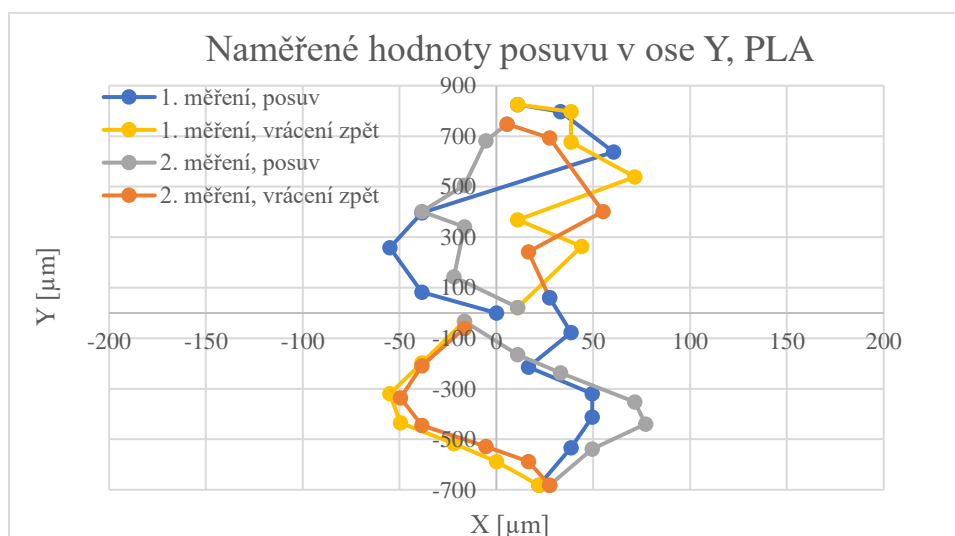
K ověření funkčnosti Posuvu XY jsem sestavila optickou soustavu s dvěma čočkami v teleskopickém uspořádání zajišťující rovnoběžný svazek s rovnoměrným rozložením intenzity a clonkou. Uspořádání lze vidět na obrázku 20. Na začátku optické cesty je zdroj světla Z generující rozbíhavý svazek nepolarizovaného světla. Za ním je polarizační člen a analyzátor v otočném uložení P, jejichž funkce je regulování výkonu svazku. Dále jsou to dvě čočky  $L_1$  a  $L_2$ , které z rozbíhavého svazku vytvoří rovnoběžný svazek o větším průměru. Svazek po průchodu čočkami prochází přes dírkovou clonu, která je umístěná ve vyrobeném komponentu XY. Na čip kamery K dopadá úzký svazek.

Vyrobený komponent byl otestován v sadě dvou měření. Pro ovládání polohy byly použity šrouby M4 se stoupáním 0,7 mm. Nejdříve jsem nastavila základní polohu. Po krocích přibližně 350  $\mu\text{m}$  jsem na čip kamery postupně zaznamenávala posunutí až do krajní polohy a po stejných krocích i zpět. Nejdříve jsem zaznamenávala posuv v ose Y (obrázek 21 a 22) ze základní polohy v jednom a poté ve druhém směru. Tímto postupem jsem mohla ověřit, jaká je opakovatelnost a zda se pružné části vrátí zpět do původní polohy. Stejný postup jsem použila i pro posunutí v ose X (obrázek 23 a 24). Testováno bylo zařízení z materiálu PLA i PETG.

Posunutí v kladných hodnotách je ve směru působení šroubů. Mínusové hodnoty posunutí jsou ve směru působení pružin.



Obrázek 20: Sestavená optická soustava k testování Posuvu XY, kde  $L_1$  - 1.čočka,  $L_2$  - 2. čočka, P – polarizační člen a analyzátor s otočným uložením pro ztlumení intenzity laserového svazku, Z - zdroj, K - kamera. XY je vyrobený komponent s upevněnou clonkou.

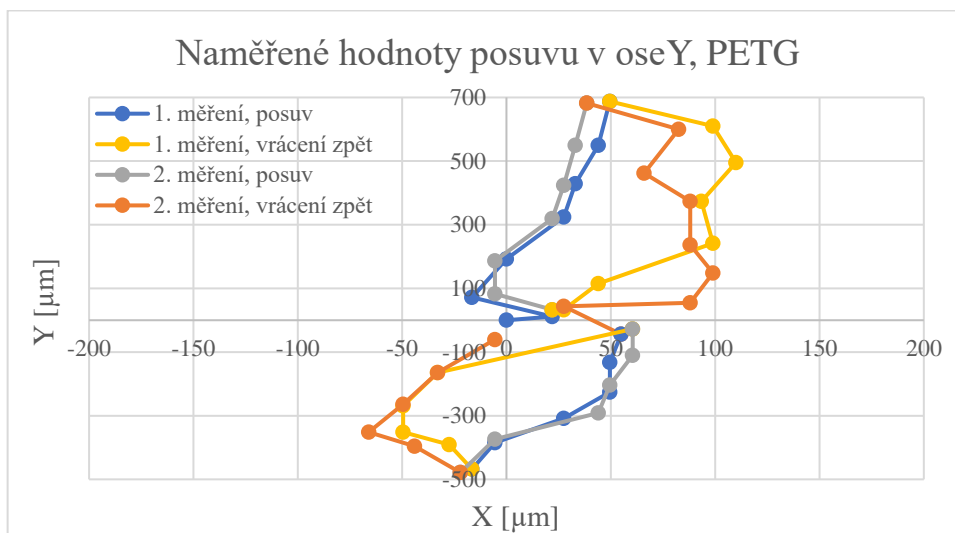


Obrázek 21: Naměřené hodnoty posuvu v ose Y u komponentu vyrobeného z PLA.

Graf na obrázku 21 ukazuje naměřené hodnoty posunutí v ose Y u komponentu z materiálu PLA. Maximální hodnota posunutí daná stoupáním šroubu by měla být v obou směrech  $1050 \mu\text{m}$ . Bylo ale dosaženo posuvu pouze  $825 \mu\text{m}$  a  $-682 \mu\text{m}$ . Důvodem je pravděpodobně nerovnoměrné stlačení pružin a také to, že se po stlačení nevrátily zcela do původní polohy. I přesto 2. měření ukázalo, že lze tohoto posunutí docílit opakovaně v podobném rozmezí. Stranové odchylky se pohybovaly v rozmezí  $+77 \mu\text{m}$  až  $55 \mu\text{m}$  vůči počáteční poloze. Vzhledem k naměřeným hodnotám lze hodnotit opakovatelnost použití. Mezi oběma sadami

měření jsou rozdíly v řádech desítek mikrometrů. Počáteční poloha a poloha po měření mají mezi sebou odchylku 16,5  $\mu\text{m}$  v ose X a 60,5  $\mu\text{m}$  v ose Y.

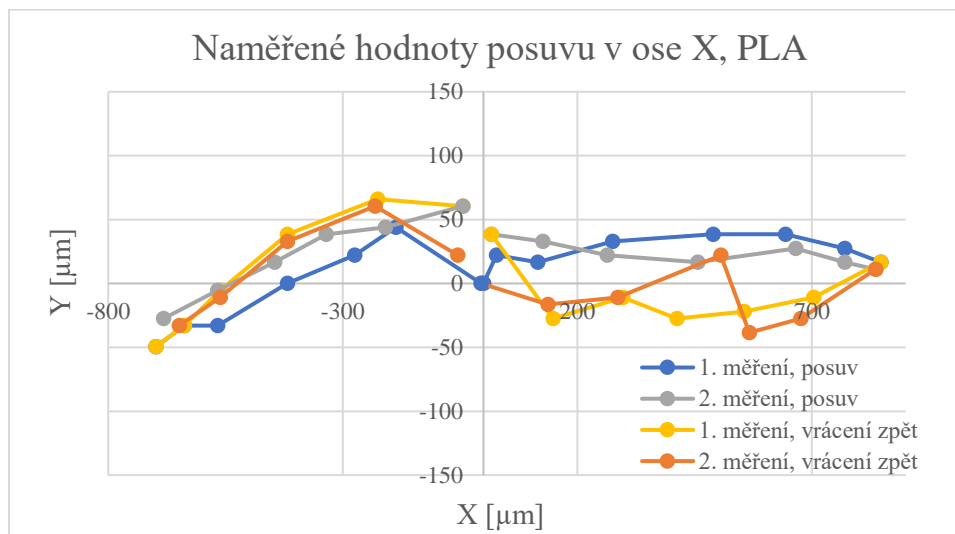
Komponent vyrobený z materiálu PETG vykazuje o něco horší výsledky (obrázek 22) než PLA. Místo požadovaného rozsahu  $\pm 1\text{ mm}$ , byla maximální hodnota posunutí v ose Y +687,5  $\mu\text{m}$  a -478,5  $\mu\text{m}$ . Odchytky v ose X byly výrazné a to 110  $\mu\text{m}$  v kladném a -66  $\mu\text{m}$  v záporném směru. Rozdíl mezi počáteční a finální polohou byl 5,5  $\mu\text{m}$  v ose X a 60,5  $\mu\text{m}$  v ose Y.



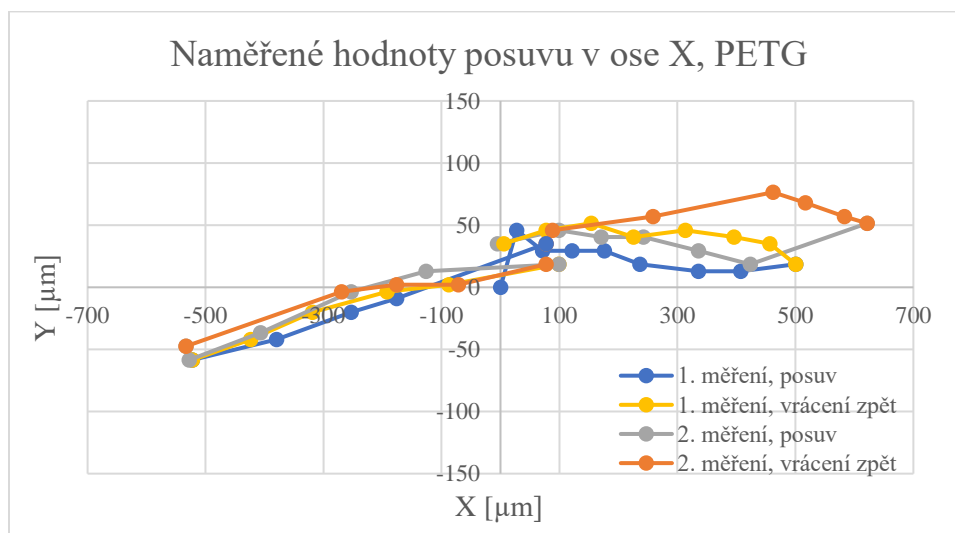
Obrázek 22: Naměřené hodnoty posuvu v ose Y u komponentu vyrobeného z PETG.

Komponent z materiálu PLA dosáhl lepších výsledků (obrázek 23) i u hodnot posunutí v ose X. Především co se týká dosaženého maximálního posuvu. Naměřený rozsah byl +847  $\mu\text{m}$  a -698,5  $\mu\text{m}$ . Zatímco u použitého PETG to bylo pouze +621,5  $\mu\text{m}$  a -533,5  $\mu\text{m}$  (obrázek 24). Opět ale u obou komponentů nebylo docíleno požadovaného posunutí  $\pm 1\text{ mm}$ . Hodnoty vých

ve směru působení pružin. U materiálu PETG došlo k vychýlení v ose X o 27,5  $\mu\text{m}$  ve směru působení šroubu a v ose Y o 11  $\mu\text{m}$  ve směru působení pružin.



Obrázek 23: Naměřené hodnoty posuvu v ose X u komponentu vyrobeného z PLA.

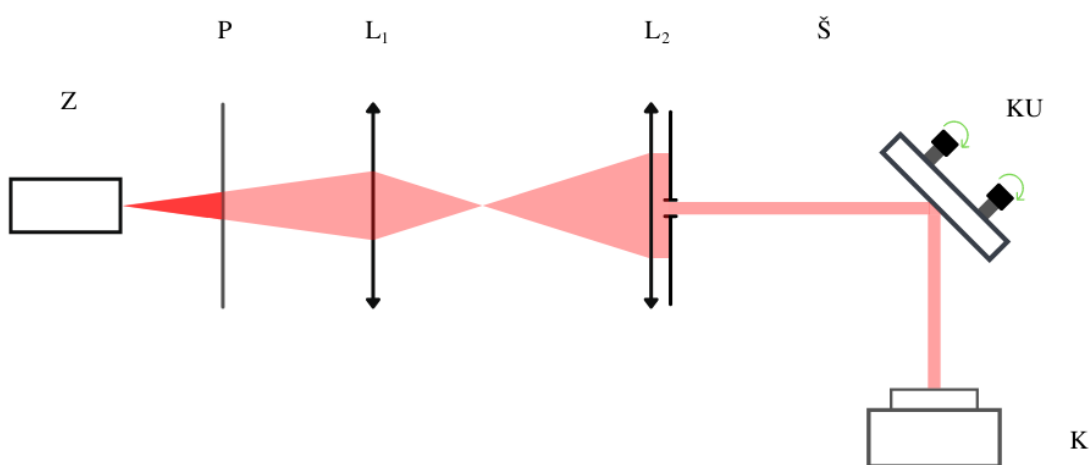


Obrázek 24: Naměřené hodnoty posuvu v ose X u komponentu vyrobeného z PETG.

Vzhledem k tomu, že lepších výsledků bylo dosaženo při použití materiálu PLA, použila jsem ho k výrobě ostatních optomechanických komponentů.

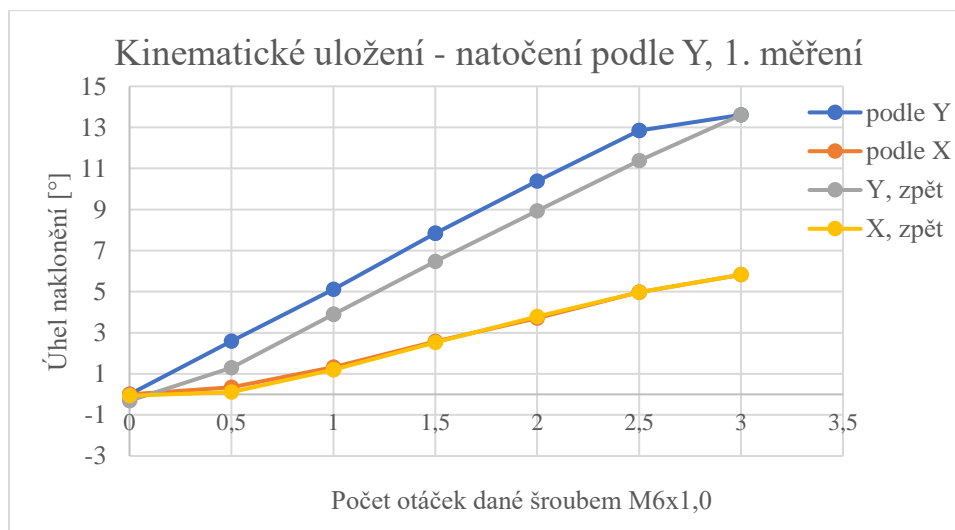
## Tříbodové kinematické uložení

Optická soustava sestavená pro ověření funkčnosti tříbodového kinematického uložení (Obrázek 25) se opět skládá ze zdroje Z, tlumícího členu P, dvou čoček  $L_1$  a  $L_2$  a štěrbin  $\check{S}$ , která je umístěná hned za 2. čočkou. Z této štěrbin vychází úzký rovnoběžný svazek, který dopadá na zrcátko umístěné v kinematickém uložení. Světelný svazek se od zrcátka odráží pod úhlem  $45^\circ$  a poté dopadá na čip kamery.

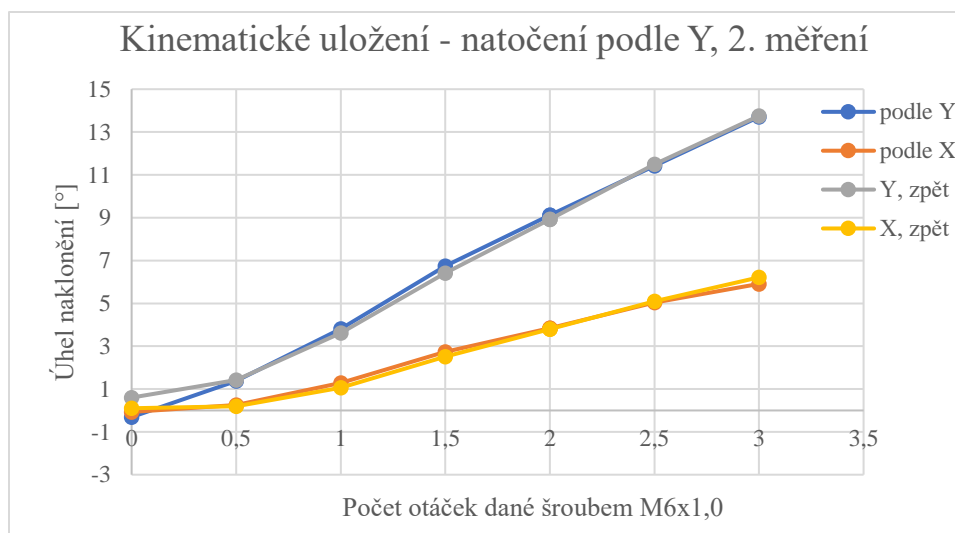


Obrázek 25: Sestavená optická soustava k ověření vyrobeného kinematického uložení, kde Z – zdroj, P – polarizační člen a analyzátor s otočným uložením pro ztlumení intenzity laserového svazku,  $L_1$  - 1. čočka,  $L_2$  - 2. čočka,  $\check{S}$  – štěrbina, K - kamera. KU je vyrobený komponent s upevněným zrcátkem.

Vyrobené kinematické uložení umožňuje natočení podle os X a Y ze základní rovnoběžné polohy jen v jednom směru daném působením polohovacích šroubů. Opět jsem postupně zaznamenávala po pravidelných krocích  $500\ \mu\text{m}$ , daných stoupáním závitu, dopadající svazek na čip kamery. Naměřené hodnoty (Obrázek 26 a 27) natočení podle osy Y ukazují, že bylo dosaženo výrazného naklonění až o  $13,7^\circ$ . Mezi dopadajícím a odraženým paprskem byl tedy úhel  $58,7^\circ$ . Zároveň s tím ale docházelo při obou měření i k nechtěnému náklonu podle osy X, a to směrem dolů. Z grafů obou měření je zřejmé, že vyrobený komponent vykazuje dobrou opakovatelnost a stabilitu, protože se v obou případech vrátil po podobných trajektoriích téměř do základní polohy a měření se od sebe výrazně neliší.



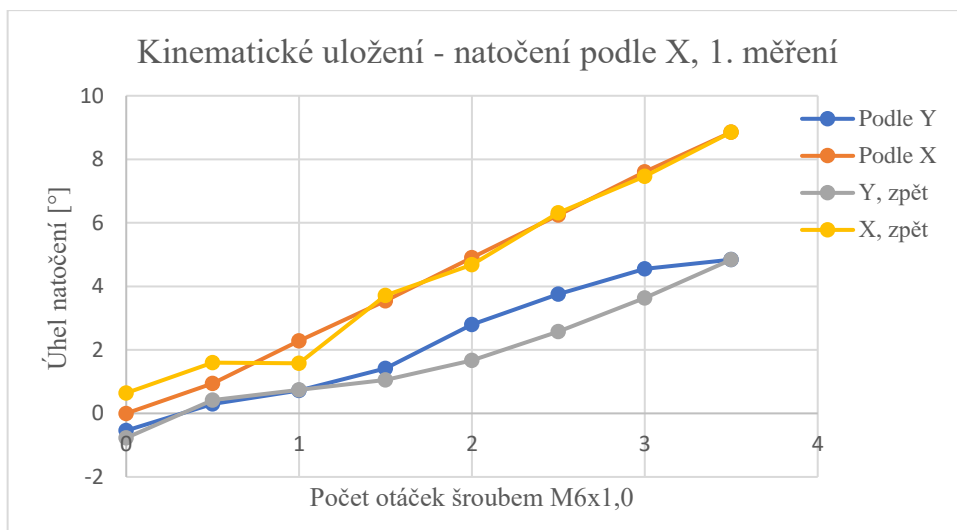
Obrázek 26: Naměřené hodnoty natočení podle osy Y u kinematického uložení při 1. měření.



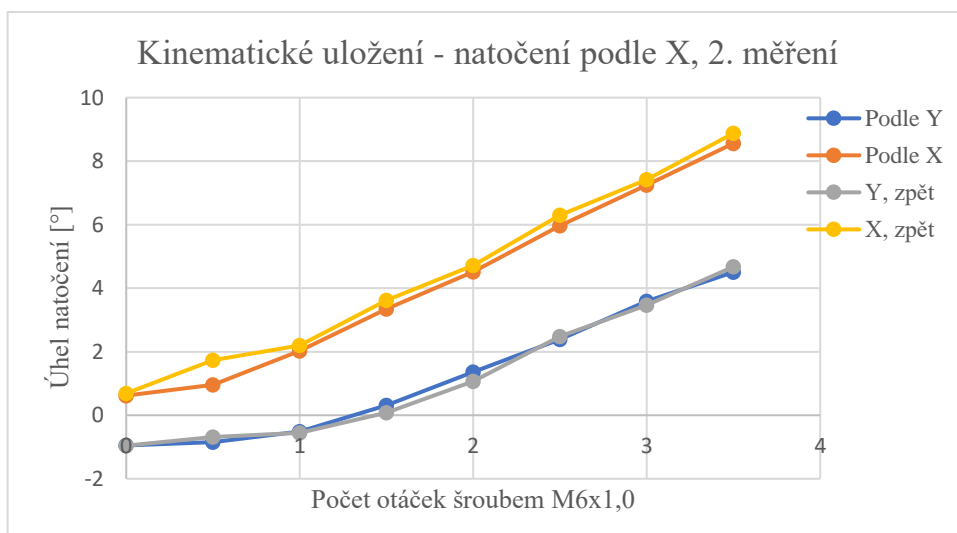
Obrázek 27: Naměřené hodnoty natočení podle osy Y u kinematického uložení při 2. měření.

Pro měření naklonění podle osy X (Obrázek 28 a 29) se komponent opět nastavil do základní polohy. Dosažené hodnoty naklonění jsou menší, než tomu bylo u natočení podle Y, konkrétně  $8,8^\circ$ . To může být dáno metodou tisku, kdy jedna z pružin je tisknuta horizontálně na podložce a druhá vertikálně ve vzduchu. Směr pokládání jednotlivých vrstev může hrát roli v rozdílných vlastnostech obou pružin. Opět zde nastává i nechtěné úhlové natočení podle osy Y. Obě měření se mezi sebou neliší výrazně, ale jsou tu rozdíly mezi počáteční základní polohou a finální polohou v obou osách asi  $1^\circ$ . I přes odchylky lze říct, že je komponent stabilní a dosáhl požadovaného natočení.





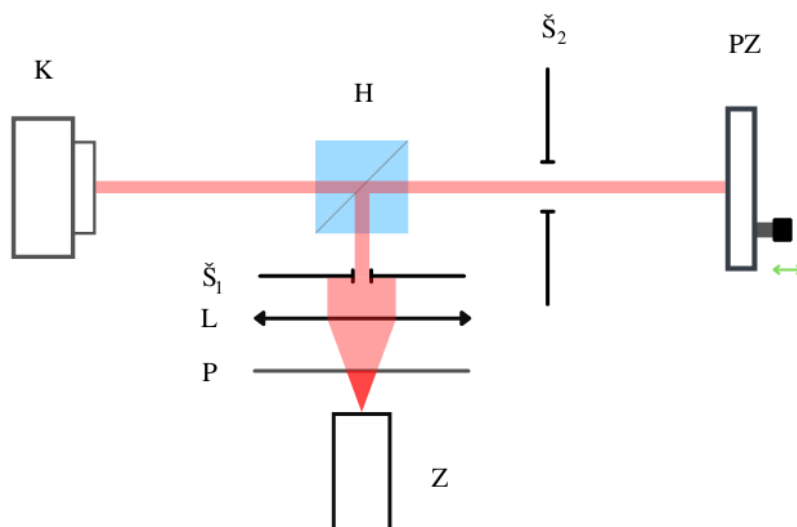
Obrázek 28: Naměřené hodnoty natočení podle osy X u kinematického uložení při 1. měření.



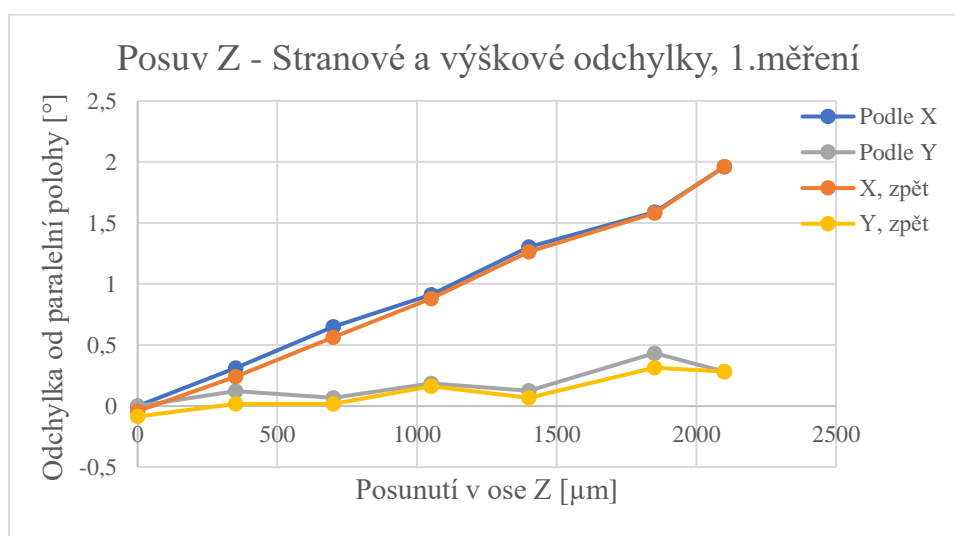
Obrázek 29: Naměřené hodnoty natočení podle osy X u kinematického uložení při 2. měření.

## Lineární posuv Z

Při ověřování lineárních posuvů Z jsem sestavila optickou sestavu s využitím hranolu, jejíž schéma je na obrázku 30. Ze zdroje světla Z vychází svazek a prochází přes polarizátor s analyzátozem v otočném uložení P skrz čočku L, která vytvoří rovnoběžný svazek. Dalším členem v optické cestě je štěrbinu  $\check{S}_1$ , která zmenší průměr svazku a hranol H. Na odrazné ploše hranolu H se svazek odrazí a prochází přes druhou štěrbinu  $\check{S}_2$ . Při sestavování byla tato štěrbinu uzavřená do nejmenšího průměru a sloužila ke správnému nastavení svazku, který přes ní prochází, odrazí se od zrcátka uloženého ve vyrobeném komponentu pro posuv v ose Z a vrací se zpět přes štěrbinu  $\check{S}_2$  a hranol H na čip kamery.



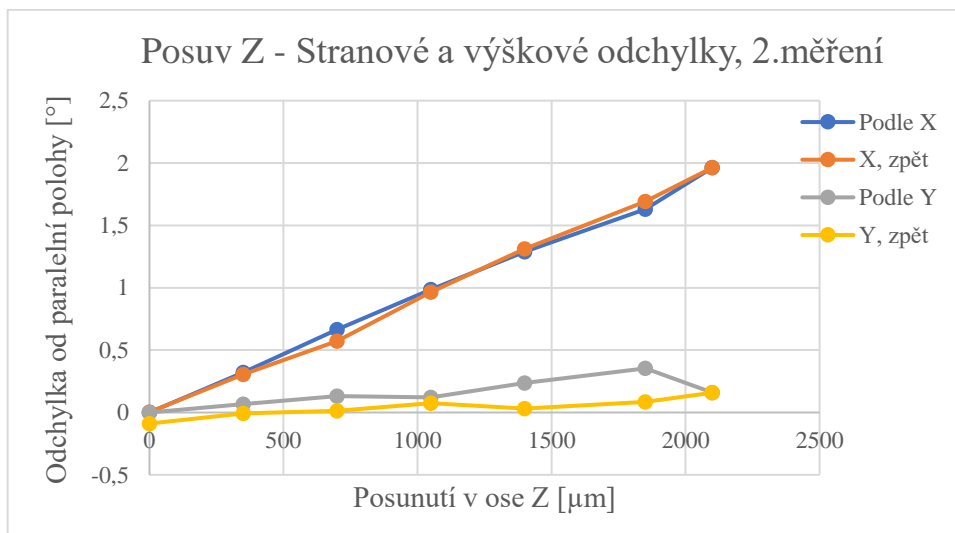
Obrázek 30: Schéma optické sestavy pro testování lineárního posuvu v ose Z, kde Z – zdroj, P – polarizační člen a analyzátor v otočném uložení pro ztlumení intenzity laserového svazku, L - čočka, Š<sub>1</sub> – 1. štěrba, H – hranol, Š<sub>2</sub> – 2. štěrba, K – kamera, PZ je vyrobený komponent s upevněným zrcátkem.



Obrázek 31: Naměřené hodnoty posunutí v ose Z a odchylky od paralelní polohy při 1. měření.

Vzhledem k použití zrcátka bylo možné zanedbat výškové posunutí, které nastává u paralelogramu. Opět jsem provedla dvě sady měření s časovým odstupem. Posun v ose Z byl přesně dán otáčkami šroubu M4. Toto posunutí jsem zároveň kontrolovala odměřením vzdálenosti dvou hlavních desek pomocí mikrometru. Zjistila jsem, že posunutí souhlasí s počtem otáček. Vyrobený komponent dosahoval rozsahu posunutí až 2,1 mm. V grafu výsledků měření (Obrázek 31 a 32) jsem tedy zobrazila úhlové odchylky v obou osách. Čím

většího posuvu v ose Z bylo dosaženo, tím větší bylo i úhlové natočení podle osy X, a to směrem dolů. Zároveň byly naměřeny i odchylky podle osy Y. Tyto odchylky mohou být způsobeny nepravidelností šroubu. Výsledky 1. i 2. měření si odpovídají.



Obrázek 32: Naměřené hodnoty posunutí v ose Z a odchylky od paralelní polohy při 2. měření.

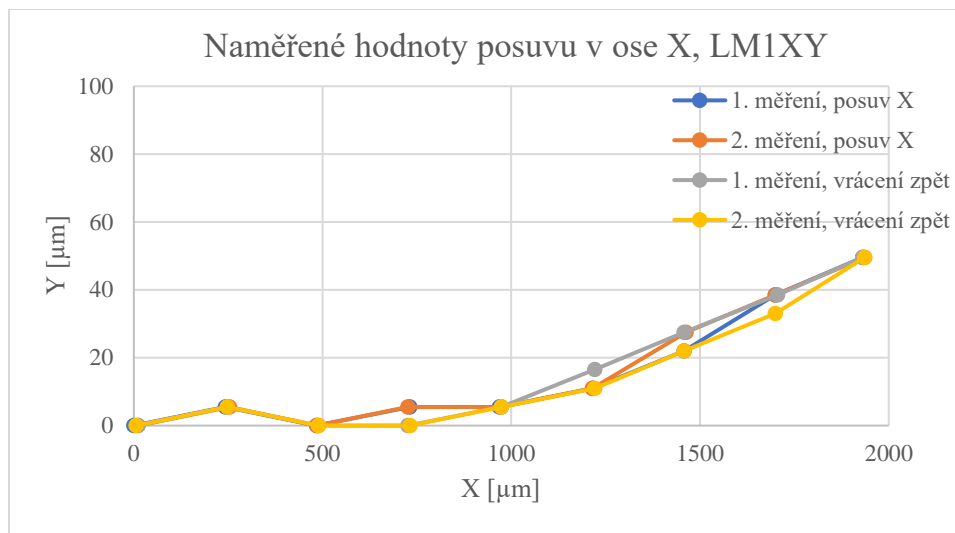
## 7.2 Porovnání s komerčně dostupnými zařízeními

Nakonec bylo nutné vyrobené optomechanické komponenty porovnat s komerčně dostupnými zařízeními z klasických materiálů od firmy Thorlabs. Vybraná zařízení byla testována ve stejných optických sestavách, které byly využity pro měření s vyrobenými komponenty. Porovnání zahrnuje porovnání cen komponentů, funkčnost a dosažené rozsahy pohybů.

### Posuv XY

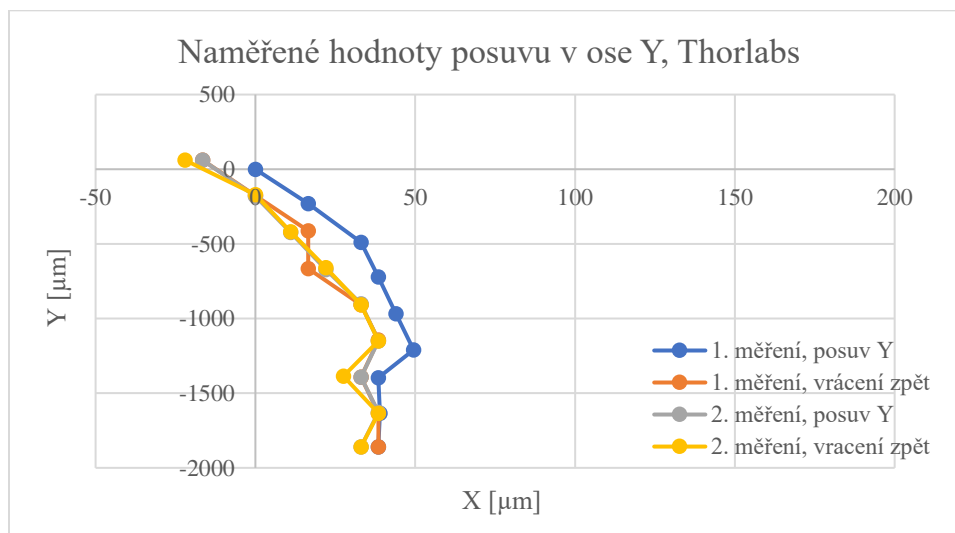
Zařízení LM1XY od firmy Thorlabs umožňuje posuv  $\pm 1$  mm ze základní polohy ve směru os X a Y. Měření probíhalo stejně jako s vytištěným komponentem s tím rozdílem, že byla nastavena základní poloha v jednom směru a v druhém, měřeném směru, byla nastavena krajní poloha a měřen byl rozsah ve směru působení šroubu. Nejdřív pro osu X a poté pro osu Y. Byly provedeny dvě sady měření, výsledky jsou na obrázcích 33 a 34. Lze vidět, že i u komerčního zařízení dochází k odchylkám v opačné ose, než je osa posunutí. Tyto odchylky se v praxi dají jednoduše eliminovat nastavením polohovacího šroubu, ale pro účely ověřování funkčnosti jsem při měření nechala nastavenou základní polohu v opačné ose v celém rozsahu posunutí. U zařízení LM1XY dosahovaly tyto odchylky hodnoty až  $50\mu\text{m}$  jak pro posunutí v ose X, tak

i v ose Y. Oproti tomu u vyrobeného komponentu z materiálu PLA došlo k výškovým odchylkám v rozsahu 115,5  $\mu\text{m}$  při posunutí v ose X a ke stranovým odchylkám v rozsahu 132  $\mu\text{m}$  při posunutí v ose Y. Maximální hodnoty posunutí v ose X byly +825  $\mu\text{m}$  a -682  $\mu\text{m}$ . U zařízení LM1XY bylo dosaženo posunutí téměř 1 mm v obou směrech.



Obrázek 33: Naměřené hodnoty posuvu v ose X u zařízení LM1XY od firmy Thorlabs.

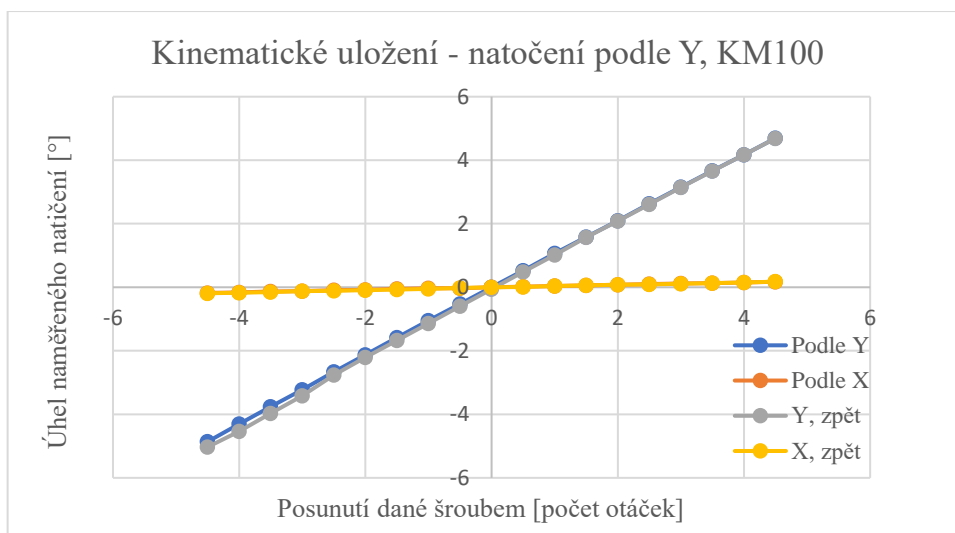
Firma Thorlabs prodává zařízení LM1XY za 127,26 €, což je v přepočtu při aktuálním kurzu asi 3240 Kč. Oproti tomu cena vyrobeného posuvu XY z materiálu PLA je 13,06 Kč.



Obrázek 34: Naměřené hodnoty posuvu v ose Y u zařízení LM1XY od firmy Thorlabs.

## Kinematické uložení

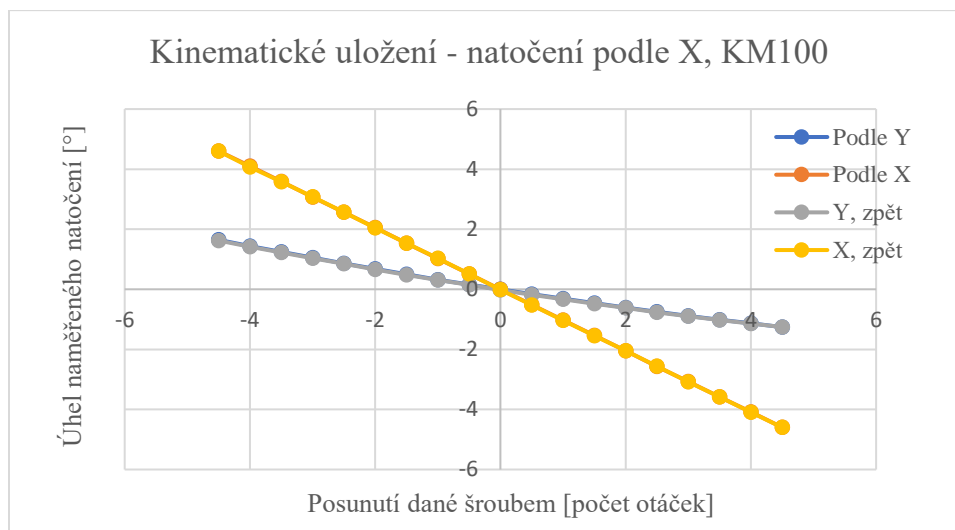
Vyrobené kinematické uložení bylo porovnáno se zařízením KM100 od firmy Thorlabs. Měření probíhalo obdobně jako u vyrobeného komponentu. Jediný rozdíl byl v tom, že zařízení KM100 umožňuje natočení v obou směrech od základní polohy, proto byla na začátku měření nastavena základní poloha v jednom směru a v druhém, měřeném směru, byla nastavena poloha krajní a po postupných krocích jedné otáčky bylo zaznamenáváno natočení až do druhé krajní polohy.



Obrázek 35: Naměřené hodnoty natočení podle osy Y u kinematického uložení KM100.

Graf na obrázku 35 ukazuje naměřené hodnoty natočení podle osy Y. Bylo dosaženo rozsahu  $\pm 4,6^\circ$ . Natočení podle osy X bylo pouze  $\pm 0,18^\circ$ . Oproti tomu vyrobené kinematické uložení umožňuje natočení ze základní polohy v rozsahu až  $13,7^\circ$ . Při této hodnotě ale zároveň dochází k natočení o  $6^\circ$  podle osy X.

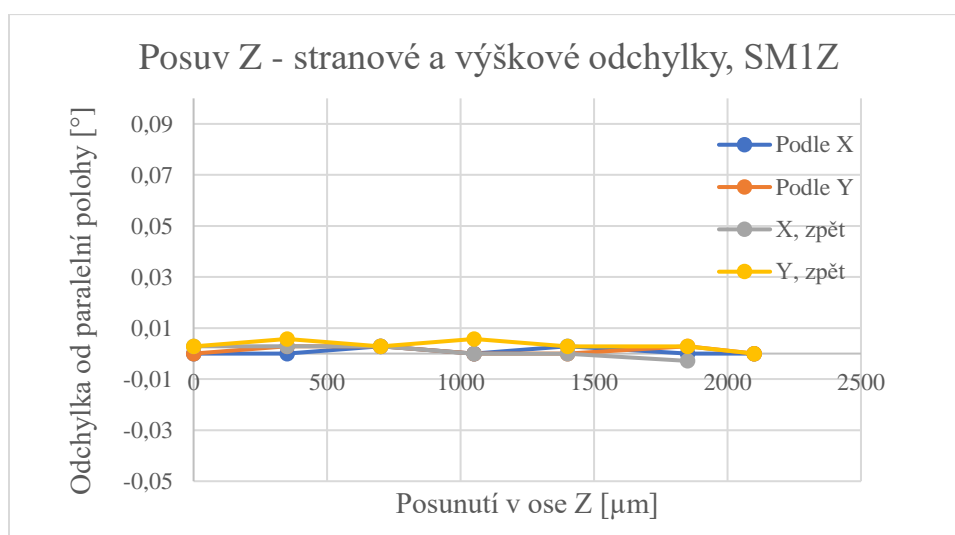
Při měření natočení podle osy X u zařízení KM100 (Obrázek 36) bylo opět dosaženo hodnot  $\pm 4,6^\circ$ . Odchytky podle osy Y byly v rozsahu  $-1,25^\circ$  až  $+1,6^\circ$  oproti základní poloze. U vyrobeného kinematického uložení z materiálu PLA bylo natočení podle X  $8,8^\circ$  a zároveň odchytky v druhém směru  $4,8^\circ$ . V případě kinematického uložení nebyly tedy naměřené hodnoty u obou zařízení tak rozdílné. Cena výroby kinematického uložení z PLA byla 26,93 Kč. Firma Thorlabs nabízí zařízení KM100 za 36,23 €, což je asi 923 Kč.



Obrázek 36: Naměřené hodnoty natočení podle osy X u kinematického uložení KM100.

## Posuv Z

Měření probíhalo stejně jako u vyrobeného komponentu. Zařízení SM1Z od firmy Thorlabs vykazovalo velice vysokou přesnost. Byly naměřeny minimální hodnoty odchylek v obou směrech (Obrázek 37), zároveň bylo dosaženo posunutí 2,1 mm. Je zde výrazný rozdíl v přesnosti oproti vyrobenému komponentu, který vykazoval odchylky v obou směrech. Cena komerčního zařízení SM1Z je 189,89 € což je v přepočtu asi 4835 Kč. Oproti tomu cena vyrobeného komponentu pomocí 3D tisku je 12,49 Kč.



Obrázek 37: Naměřené hodnoty odchylek a posunutí u zařízení SM1Z.

## 8 Návrh a výroba polarimetru

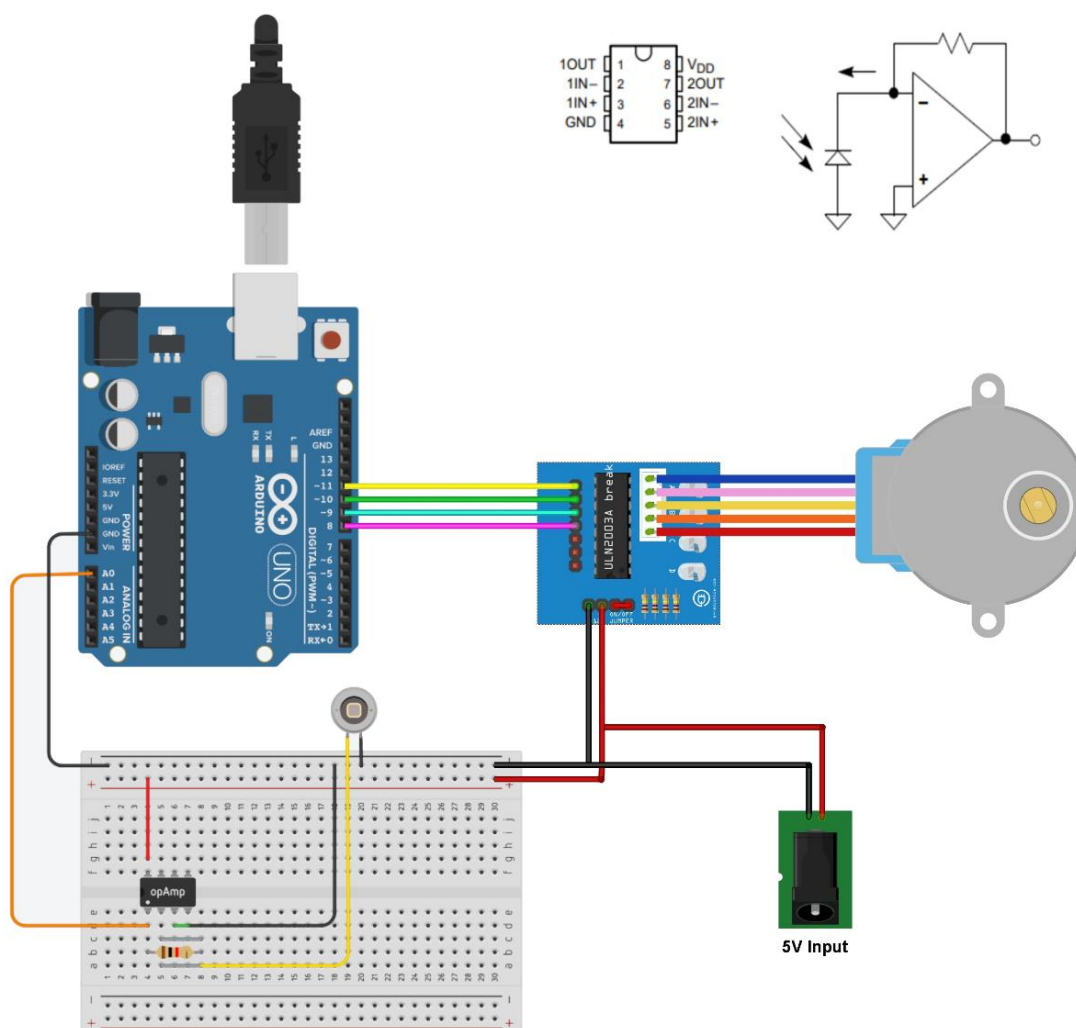
Jako komplexní optomechanické zařízení kombinující mechanické a elektrické součástky a díly vytvořené 3D tiskem, byl vyroben polarimetr. K sestavení jsem využila Arduino, krokový motor, zesilovač, fotodiodu, polarizační folii a radiální ložisko. Ozubené soukolí, rám pro upevnění všech částí, hřídel a matice k upevnění ložiska, uchycení polarizační fólie do vnitřní části matice a upevnění fotodiody byly vytisknuty na 3D tiskárně Prusa Mini z materiálů PETG a PLA. Otáčením lineární polarizační fólie pomocí krokového motoru a následném zaznamenávání intenzity lze zjistit vlastnosti polarizovaného světla. Konkrétně jeho intenzitu, fázové posunutí, amplitudu a z toho určit, o jaký typ polarizace jde. Výhodou tohoto zařízení oproti klasickým komerčním zařízením je, že funguje pro celou viditelnou oblast, protože funkce polarizátoru nezávisí na vlnové délce. S tím souvisí i nižší cena vyrobeného zařízení. Nevýhodou je, že vstupující světlo musí být polarizované (lineárně, kruhově nebo elipticky). Zároveň nelze zjistit směr polarizace u elipticky a kruhově polarizovaného světla – zda jde o pravotočivě nebo levotočivě polarizované.

Vyrobený polarimetr má sloužit k popisu polarizovaného světla. Oproti tomu autoři Bernard a Mendez [19] sestavili polarimetr, který umožňuje měřit úhel otáčení polarizovaného světla po průchodu vzorkem opticky aktivní látky. Tělo polarimetru vytiskli z materiálů ABS a PLA. Dále využili zdroj monochromatického světla, komory se vzorky a dva polarizační filtry. Jeden polarizační filtr umístili před vzorek a druhý, který je otočný, za vzorek. Druhý filtr umožňuje přizpůsobení úhlu po průchodu vzorkem pro minimalizaci nebo maximalizaci procházejícího světla.

### 8.1 Elektrické a mechanické součástky

K sestavení polarimetru byly využity snadno dostupné elektrické a mechanické součástky. Schéma zapojení elektroniky je na obrázku 38, kde je zapojeno komunikační rozhraní Arduino s krokovým motorem, zesilovačem, fotodiodou a zdrojem napětí.

Krokový motor 28BYJ-48 (Obrázek 39) je řízen čtyřmi digitálními signály, které vedou do řadiče neboli driveru. Vybraný řadič je určen pro čtyřfázový krokový motor s modulem pro Arduino ULN2003 s napájením 5V. Má převodový poměr 1/64 a úhel kroku  $5,625 \times 1/64$ .



Obrázek 38: Schéma zapojení elektronických částí polarimetru. Arduino Uno je propojeno s řadičem motoru a krokovým motorem, se zesilovačem, fotodiodou a zdrojem napětí. V horní části obrázku je napravo schéma zapojení fotodiody s operačním zesilovačem a nalevo je schéma pinu operačního zesilovače.

Použité Arduino Uno R3 je mikrokontrolérová vývojová deska, přes kterou se přenáší informace do PC. Obsahuje 14 digitálních vstupních/výstupních pinů, 6 analogových vstupů, připojení pomocí USB, napájecí konektor, záhlaví ICSP a resetovací tlačítko. Lze ho jednoduše připojit k počítači pomocí USB. Pracovní napětí je 5V. Do obvodu musel být zapojen také zesilovač TLC272CP pro zvýšení rozlišení, jehož zesílení se řídí pomocí rezistoru s odporem 360 k $\Omega$ , který lze snadno vyměnit v nepájivém poli.





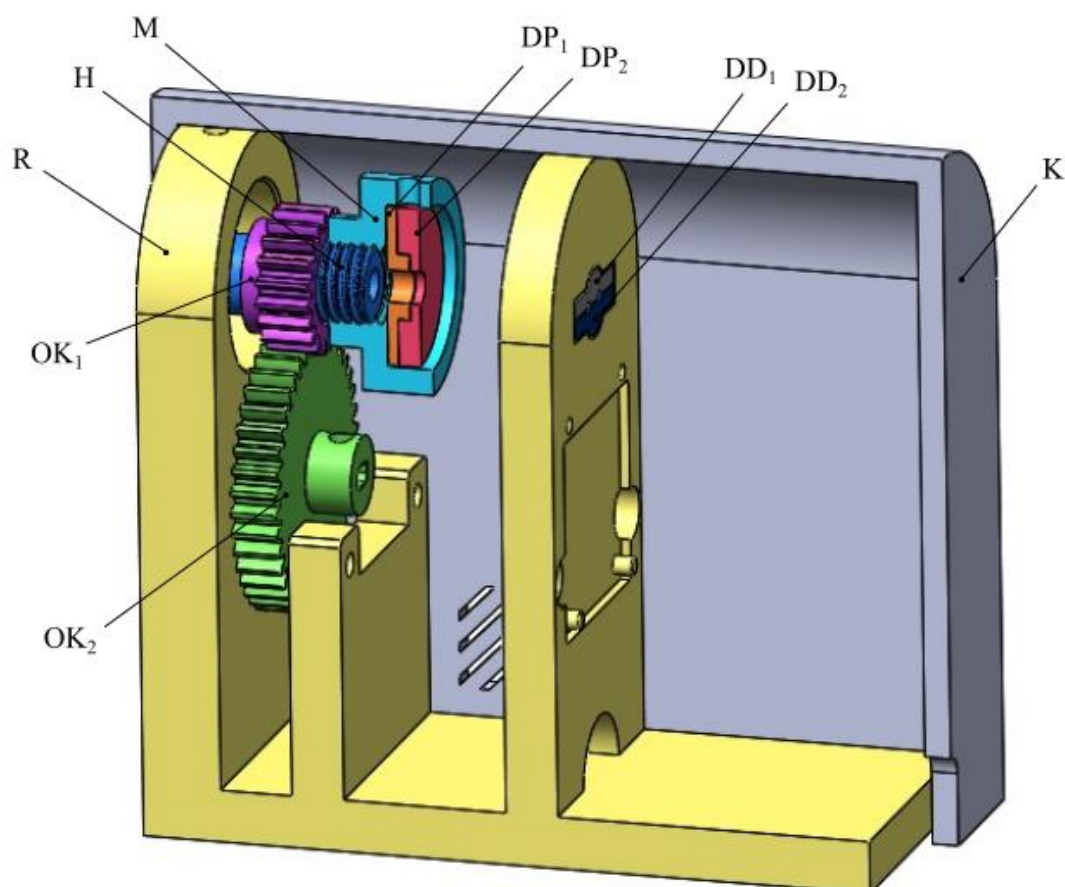
Obrázek 39: Krokový motor a řadič pro krokový motor, využité k sestavení polarimetru.

Pro detekci světla byla vybrána fotodioda BPW34. Snímá světlo v rozmezí 430-1000 nm a maximální citlivost má ve vlnové délce 900 nm. Aktivní plocha je 7,5 mm<sup>2</sup>. Řízení čtení fotodiody je zajištěno jedním analogovým signálem s rozlišením zhruba 4,9 mV.

Dále byla při konstrukci využita lineární polarizační fólie, což je levný, komerčně dostupný materiál. Poslední netištěnou součástí v sestavě polarimetru je jednořadé radiální kuličkové ložisko ZKL6001-2Z, zajišťující rotaci vytištěné hřídele s uchycenou polarizační fólií. Je určeno pro uložení s rotujícím vnitřním kroužek.

## 8.2 Vytištěné díly

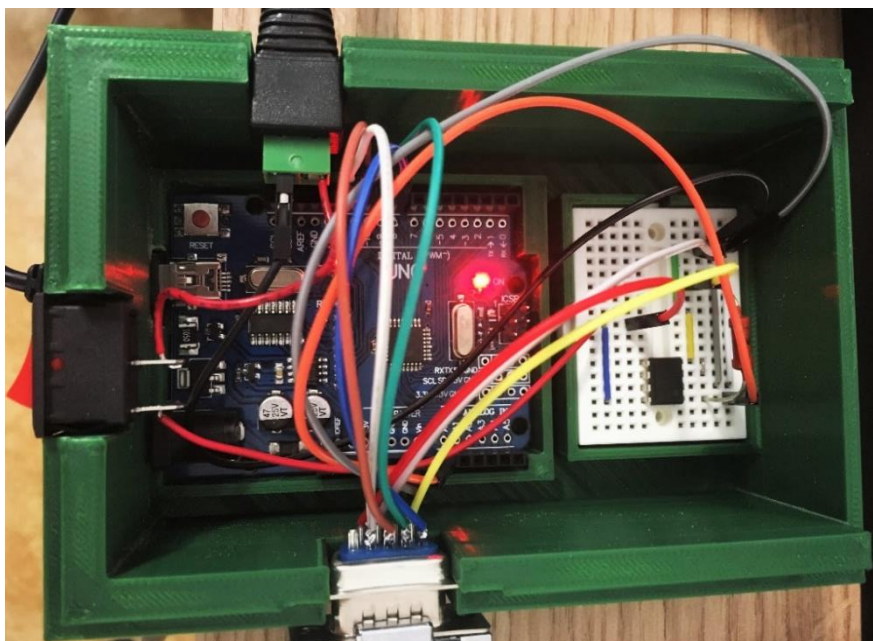
Na obrázku 40 jsou zobrazeny díly, které byly vyrobeny pomocí 3D tisku. Polarizační fólie je uchycena ve vytisknutém pouzdře ze dvou částí DP<sub>1</sub> a DP<sub>2</sub>, které je zajištěno a upevněno pomocí stavěcího šroubu k matici M. V matici je vytisknut vnitřní závit, který odpovídá vnějšímu závitů na hřídeli H, která je rovněž vytištěná. Vedle malého ozubeného kola OK<sub>1</sub> je místo na radiální ložisko. Utažením matice se připevní ložisko k malému ozubenému kolu a je zajištěno otáčení pouzdra s polarizační fólií. Velké ozubené kolo OK<sub>2</sub> je spojeno s krokovým motorem, který řídí rotaci. Ozubené soukolí má převodový poměr 2. Motor je pomocí šroubů M4 připevněn k rámu.



Obrázek 40: 3D návrh tištěných část polarimetru, kde R – rám, H – hřídel, OK<sub>1</sub> – ozubené kolo malé, OK<sub>2</sub> – ozubené kolo velké, M – matice, DP<sub>1</sub> – držák polarizační fólie 1. část, DP<sub>2</sub> – držák polarizační fólie 2. část, DD<sub>1</sub> – držák fotodiody 1. část, DD<sub>2</sub> – držák fotodiody 2. část, K – kryt.

V zadní části druhé části rámu se nachází prohloubení na uchycení fotodiody DD<sub>1</sub> a DD<sub>2</sub>. Samotné uchycení je vytisknuto ze dvou drobných dílů, které se na sebe nasadí a poté vloží do prohloubení. Pod ním je vytvořeno větší, čtvercové prohloubení a dvě díry pro vyříznutí závitové díry M3. To slouží k upevnění řadiče krokového motoru. Ten je spojen s krokovým motorem, proto je ve spodní části otvor pro kabely. Celá tato část polarimetru je překryta krytem K, ve kterém jsou pouze úzké podlouhlé otvory pro větrání v blízkosti motoru z důvodu jeho zahřívání a díra pro propojení s Arduinem a zesilovačem.

Pro umístění Arduina a zesilovače byla vytisknuta obdélníková krabička (Obrázek 41), ve které jsou zároveň otvory pro zapojení USB, napájení, konektor pro spojení s motorem a vypínač.



Obrázek 41: Uložení Arduina a zesilovače do vytištěné krabičky s otvory pro USB, napájení, konektor pro spojení s krokovým motorem a vypínač.

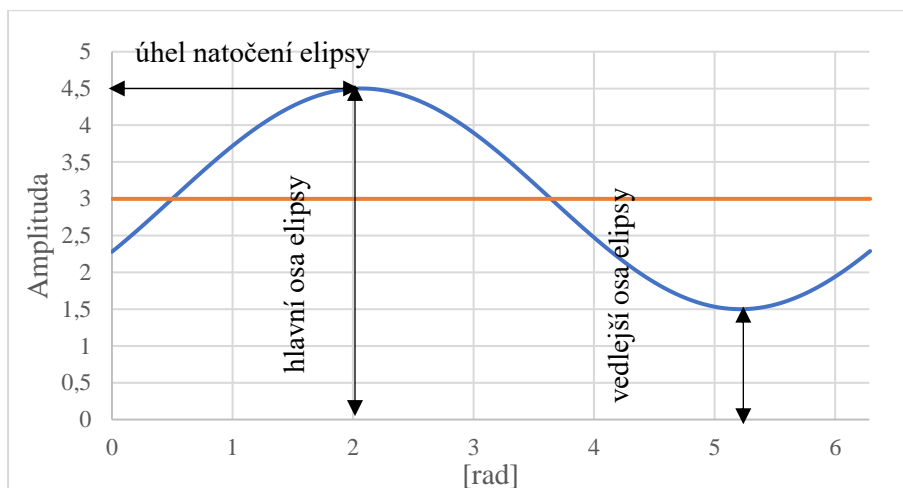
Tabulka 9: Kusovník polarimetru

Název sestavy: <b>Polarimetr</b>				Rozměry			
	Název dílu	Ks	Materiál/ Norma	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Cena [Kč]
1	Rám	1	PETG	103	44	112	43,85
2	Kryt	1	PETG	108	53	122	82,55
3	Matice	1	PLA	33	33	16	4,14
4	Hřídel	1	PLA	18	18	30	1,72
5	Ozubené kolo 20 mm	1	PLA	22	22	11	1,27
6	Ozubené kolo 40 mm	1	PLA	42	42	14	3,84
7	Krabička	1	PLA	46	90	130	67,34
8	Krabička vršek	1	PLA	20	91	131	35,17
9	Uchycení fotodiody 1.část	1	PLA	3	6,5	20	0,17
10	Uchycení fotodiody 2.část	1	PLA	3	5	20	0,16
11	Uchycení polarizační fólie 1.část	1	PLA	3,5	25	25	0,95
12	Uchycení polarizační fólie 2.část	1	PLA	3,6	25	25	0,7
13	Šroub M4x16	2	DIN 921				17,76
14	Šroub M3x8	2	DIN 912				0,72
15	Šroub stavěcí M4x6	1	DIN 913				0,3
16	Šroub stavěcí M4x10	1	DIN 913				0,3
17	Krokový motor 28 BYJ-48	1					58
18	Řadič krokového motoru ULN2003APG	1					24
19	Operační zesilovač TLC272CP	1					42
20	Arduino UNO R3	1					180
21	Ložisko ZKL6001-27	1					24
22	Fotodioda BPW34	1					18
23	Polarizační fólie	1					50
Celková cena výroby							686,94

### 8.3 Nastavení řízení polarimetru

Ovládání řízení systému (Obrázek 43) má dvě hlavní části – řídící počítač, který řídí zpracování signálu a grafickou prezentaci polarizační elipsy a Arduino UNO, které zprostředkovává řízení krokového motoru a převod analogového signálu z fotodiody na digitální. Ovládání systému počítačem probíhá na dvou úrovních v prostředí LabVIEW 2019. Uživatelská úroveň je zastoupena virtuálními instrumenty pro inicializaci systému, řízení pohybu krokového motoru, čtení stavu fotodiody, změnu rychlosti motoru a ukončení komunikace. Důležitý parametr při inicializaci je číslo sériového portu, který musí uživatel zadat manuálně. Systém LabVIEW aktualizuje seznam dostupných portů dynamicky, takže při zapnutí Arduina vidět, který port se v seznamu nově objevil a má být zvolen jako komunikační kanál. Inicializovaný port je poté veden spolu s chybovou linkovou v blokovém diagramu všemi uživatelskými procedurami jako povinný parametr. U procedury pro řízení pohybu krokového motoru jsou tyto povinné parametry doplněny ještě o počet kroků. Vzhledem k převodovému poměru ozubeného soukolí polarimetru, vnitřní převodovky krokového motoru 28BYJ-48 a typu řízení motoru dojde k plnému otočení držáku polarizační fólie při dokončení 1024 kroků. Uživatelská procedura pro čtení stavu fotodiody nevyžaduje žádné vstupní parametry a poskytuje jeden výstup ve formátu čísla s plovoucí desetinnou čárkou. Rychlost motoru je možné měnit nastavením délky prodlevy mezi jednotlivými kroky. Procedura pro změnu rychlosti motoru má tedy pouze jeden vstupní argument, a to délku prodlevy v  $\mu\text{s}$ . Tyto hodnoty se pohybují v rozmezí asi 700–1000  $\mu\text{s}$ . Při ukončení programu je vhodné uzavřít komunikační kanál a uvolnit jej pro případné využití jinými programy či operačním systémem.

Hlavní program (Polarimetr.vi) zajišťuje postupné pootočení polarizátoru, vyčítání intenzity světla dopadajícího na fotodiodu v jednotlivých bodech a zjištění parametrů harmonické funkce popisující tento průběh. Parametry harmonické funkce jsou naznačeny v grafu na obrázku 42. Z této funkce je poté rekonstruován Jonesův vektor. Vzhledem k tomu, že z těchto informací nelze zjistit směr polarizace, byla pro reprezentaci Jonesova vektoru zvolena pravotočivá orientace. Z normalizovaného vektoru je odvozen tvar polarizační elipsy a ta se zobrazuje na čelním panelu ovládacího software. Pro kontrolu je rovněž ukázána naměřená harmonická funkce.

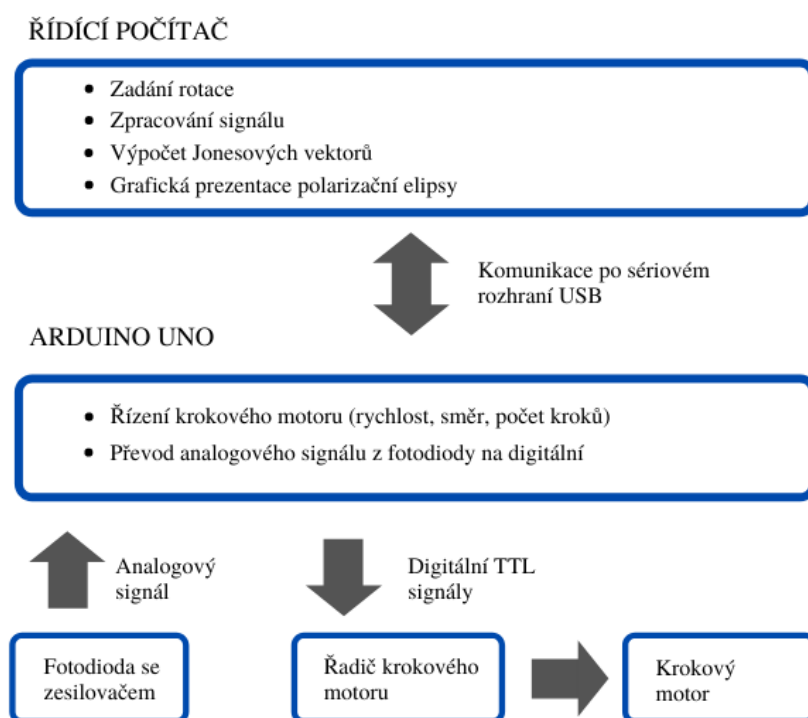


Obrázek 42: Graf harmonické funkce s označenými parametry elipsy.

Jonesův vektor lze získat ze vztahu:

$$J = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) + i \cdot \frac{b}{a} \cdot \sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) - i \cdot \frac{b}{a} \cdot \cos(\alpha) \end{pmatrix}, \quad (8.1)$$

kde  $b$  je poloměr vedlejší osy elipsy,  $a$  je poloměr hlavní osy elipsy,  $\alpha$  – úhel natočení elipsy.



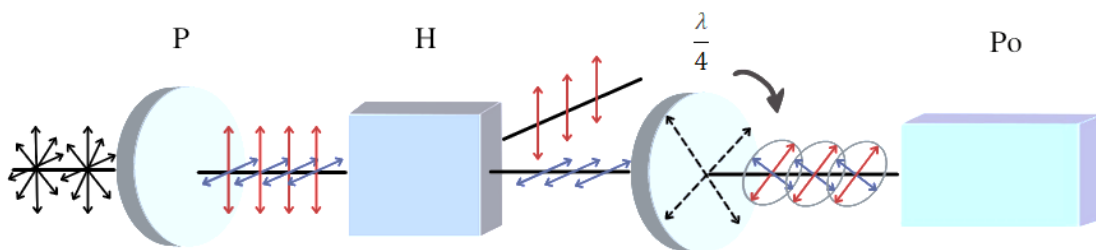
Obrázek 43: Ovládání řízení polarimetru

Nízkoúrovňové procedury zajišťují komunikaci po USB prostřednictvím softwarového rozhraní VISA. Jedná se o nástroje pro odeslání a příjem příkazu a pro odeslání a příjem parametrů ve formátu dvoubytového celého čísla. Tyto procedury spolu s protějšky v Arduinu připravil vedoucí práce Petr Jákl.

Vývojové prostředí Arduino IDE používá zjednodušený dialekt jazyka C, který je po kompilaci přenesen pomocí USB do flash paměti. Tento typ paměti zajišťuje dostupnost programu i po vypnutí a opětovném zapnutí vývojové desky do zdroje elektrické energie. Zařízení s nahraným programem lze tedy po vývoji a otestování používat i s počítači, na kterých není vývojové prostředí k dispozici. V části `setup()` jsou nastaveny parametry vývojové desky – výstupní digitální signály pro krokový motor, inicializace sériové komunikace a počáteční spojení s řídicím počítačem. V části `loop()` pak běží nekonečná smyčka, ve které se čeká na příkazy od LabVIEW. Po přijetí jednoho z příkazů se vykoná odpovídající procedura. Pro řízení krokového motoru je používán systém half-step, při kterém jsou čtyři elektromagnety (označené písmeny A, B, C, D) adresovány systémem A-AB-B-BC-C-CD-D-DA-A. Tato realizace zajišťuje, že všechny digitální signály jsou nastaveny současně a nedochází k mechanickému rušení během přechodu na nový krok.

## 8.4 Ověření funkčnosti

Sestavila jsem jednoduchou optickou sestavu pro ověření funkčnosti vyrobeného polarimetru, jejíž schéma je na obrázku 44. Ze zdroje napětí vychází nepolarizované světlo. Nejdříve prochází čočkou, která vytvoří rovnoběžný paprsek. Dále paprsek prochází polarizátorem, který zajistí polarizované světlo. To dopadá na dělič polarizačních paprsků – má speciální dielektrickou vrstvu podél diagonálního rozhraní mezi pravoúhlými hranoly – tato vrstva odráží s-polarizované světlo a propouští p-polarizované světlo. Z hranolu tedy vychází světlo polarizované pouze v horizontálním směru. Průchodem přes čtvrtvlnnou destičku lze natočením získat jakýkoli typ polarizace světla. Poté záření dopadá na fotodiodu vyrobeného polarimetru a může být zaznamenáváno. Pro kontrolu výsledků a porovnání posloužil polarimetr PX1000VIS/M od firmy Thorlabs, který měří stav polarizace kolimovaného monochromatického světla v rozsahu 400-700 nm. Lze ho využít ke zjištění stupně polarizace (neboli DOP), tvaru i směru polarizace. Toto měření probíhalo prostřednictvím PAX100 software [21].



Obrázek 44: Optická sestava sloužící k měření polarizovaného světla, kde P - polarizátor, H - hranol,  $\frac{\lambda}{4}$  – čtvrtvlnná destička, Po - polarimetr.

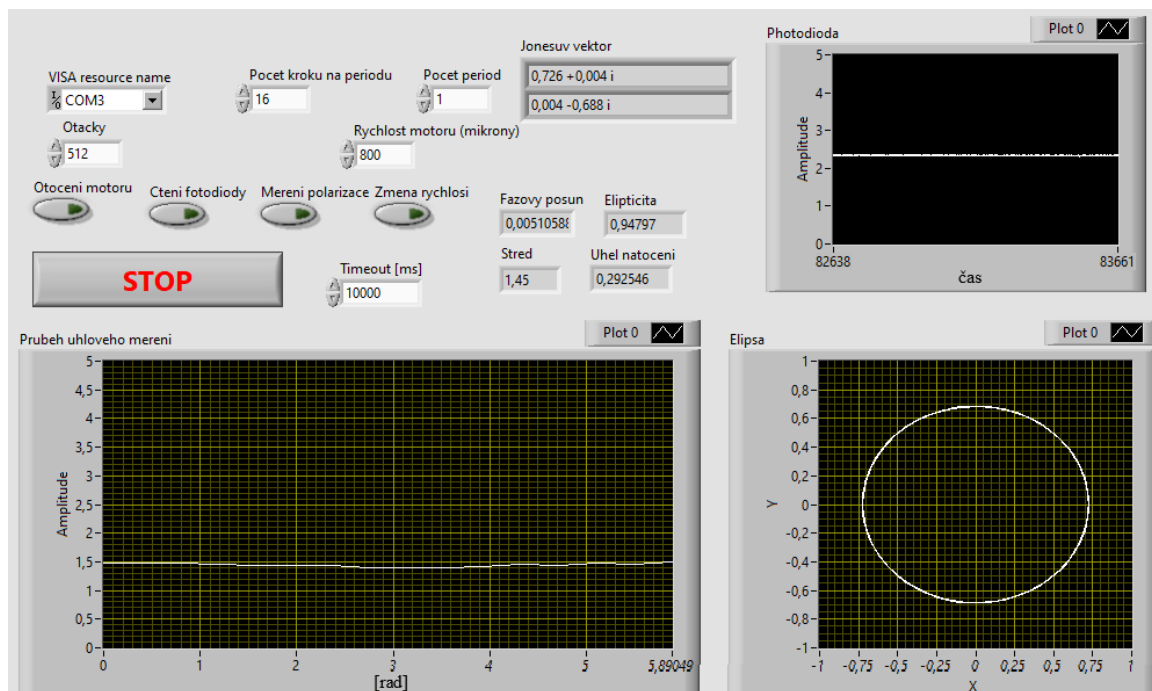
Na začátku měření bylo nutné zkalibrovat vyrobený polarimetr, aby polarizační fólie v zařízení měla správnou orientaci s propustným směrem v horizontální rovině. Po této kalibraci již mohlo začít probíhat měření. Před samotným měřením jsem si nastavila počet kroků na periodu a počet otáček. Po pootočení čtvrtvlnnou destičkou jsem vždy nejdříve zaznamenala prošlé světlo prostřednictvím příkazu „Měření polarizace“. Poté jsem vyrobený polarimetr nahradila polarimetrem od firmy Thorlabs a stejný signál změřila znovu a porovnála. Naměřené hodnoty jsou vypsány v tabulce 10. Na obrázku 45 je jeden ze snímků provedeného měření. V čelním panelu programu LabVIEW jsou zobrazené informace získané o polarizovaném světle. Za pozornost stojí především úhlové natočení (ve stupních), elipticita a zobrazený graf polarizační elipsy. Zároveň jsou zde i vypočítané Jonesovy vektory. Graf s názvem „Photodioda“ neukazuje aktuální signál, protože vždy může probíhat pouze jeden z příkazů. Z naměřených hodnot a tvaru elipsy lze usoudit, že v tomto případě jde o téměř kruhově polarizované světlo. Elipticita, která zde vyjadřuje poměr poloos elipsy a může nabývat hodnot 0-1 (kde 0 znamená lineárně polarizované světlo a hodnota 1 kruhově polarizované světlo), je 0,95. Oproti tomu na obrázku 46 je záznam stejné polarizace polarimetrem PX1000VIS/M. Naměřená polarizace má elipticitu  $44,38^\circ$ , což znamená, že jde o téměř kruhově polarizované světlo. Tento úhel charakterizuje míru změny rovině polarizovaného světla na elipticky polarizované. Elipticitu lze získat přepočtem :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{b}{a} \quad (8.2)$$

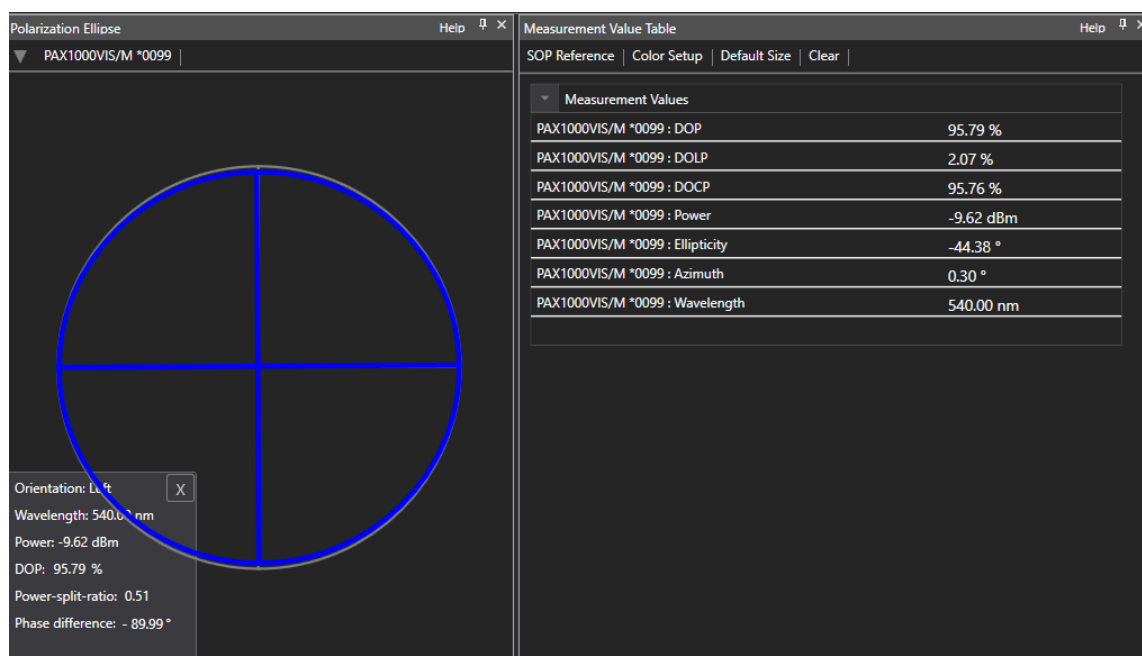
, kde  $\alpha$  je úhel charakterizující míru změny rovině polarizovaného světla na elipticky polarizované,  $b$  a  $a$  jsou velikosti poloos. Úhel  $44,38^\circ$  tedy odpovídá elipticitě 0,98.



Úhel natočení naměřený oběma přístroji je téměř stejný, a to konkrétně  $0,29^\circ$  a  $0,3^\circ$ . U komerčního zařízení lze zjistit více parametrů, např. stupeň polarizace, který je téměř 96%.



Obrázek 45: Záznam o dopadajícím polarizovaném světle v čelním panelu prostředí LabVIEW, zaznamenaný vyrobeným polarimetrem.



Obrázek 46: Záznam o dopadajícím polarizovaném světle naměřené polarimetrem PX1000VIS/M prostřednictvím volně dostupného software.

Tabulka 10: Naměřené hodnoty charakterizující typ polarizace pro čtyři různá natočení čtvrtvlnné destičky.

		<b>Elipcticita</b>	<b>Úhel natočení</b>	<b>Typ polarizace</b>	<b>Směr polarizace</b>
<b>1.</b>	<b>Vyrobený polarimetr</b>	0,14	17,7°	Eliptická	nelze
	<b>PX1000VIS/M</b>	0,26	15,9°	Eliptická	Levotočivá
<b>2.</b>	<b>Vyrobený polarimetr</b>	0,49	-18,3°	Eliptická	nelze
	<b>PX1000VIS/M</b>	0,47	-20,42°	Eliptická	Pravotočivá
<b>3.</b>	<b>Vyrobený polarimetr</b>	0,95	0,29°	Téměř kruhová	nelze
	<b>PX1000VIS/M</b>	0,98	0,3°	Téměř kruhová	Levotočivá
<b>4.</b>	<b>Vyrobený polarimetr</b>	0,08	2,1°	Téměř lineární	nelze
	<b>PX1000VIS/M</b>	0,03	-0,08°	Téměř lineární	Pravotočivá

Při druhém měření jsem do optické sestavy přidala další prvek - polarizátor. Čtvrtvlnnou destičku jsem nastavila do takové polohy, aby z ní vycházelo kruhově polarizované světlo. Přidáním polarizátoru mezi destičku a polarimetr jsem získala světlo lineárně polarizované a natočením polarizátoru jsem měnila úhel této polarizace. Nastavila jsem polarizátor do čtyř různých poloh a zaznamenávala jsem výslednou polarizaci jak pomocí vyrobeného polarimetru, tak polarimetru PX1000. Výsledky měření jsou v tabulce 11.

Tabulka 11: Naměřené hodnoty vlastností lineárně polarizovaného světla.

		<b>Elipcticita</b>	<b>Úhel natočení</b>	<b>Typ polarizace</b>	<b>Směr polarizace</b>
<b>1.</b>	<b>Vyrobený polarimetr</b>	0,08	1,3°	Téměř lineární	nelze
	<b>PX1000VIS/M</b>	0,0035	-0,18°	Téměř lineární	Levotočivě
<b>2.</b>	<b>Vyrobený polarimetr</b>	0,08	32°	Téměř lineární	nelze
	<b>PX1000VIS/M</b>	0,0014	30,39°	Téměř lineární	Levotočivě
<b>3.</b>	<b>Vyrobený polarimetr</b>	0,086	-88°	Téměř lineární	nelze
	<b>PX1000VIS/M</b>	0,0028	-89,88°	Téměř lineární	Pravotočivě
<b>4.</b>	<b>Vyrobený polarimetr</b>	0,082	-50°	Téměř lineární	nelze
	<b>PX1000VIS/M</b>	0,0002	-51,76°	Téměř lineární	Pravotočivě

## 9 Závěr

Nové technologie umožňují zkrátit vývojový cyklus nových zařízení a rychlé prototypování. S využitím 3D tisku lze vytvořit prototypy drobnějších součástek s velkou úsporou času a nákladů na výrobu. Cílem této diplomové práce bylo zvládnutí technologie, návrh a výroba optomechanických komponentů z polymerních materiálů, které budou funkční s využitím co nejmenšího počtu dalších součástek a budou nacházet uplatnění zejména ve výuce nebo aplikacích, které nevyžadují vysokou přesnost. Vyrobené optomechanické komponenty nedosahovaly stejně vysokých přesností jako jejich komerční protějšky, přesto mohou být užitečné při nastavování chodu svazku optickým systémem. Uživatel se ovšem musí adaptovat na postup, u kterého jsou nechtěné výchylky kompenzovány posuny ve druhé ose či okolními elementy. Velkou výhodou je jejich nízká cena a výrazně rychlejší dostupnost. Pro příklad cena vyrobeného optomechanického komponentu pro posuv v osách XY byla 13,06 Kč z toho 9,78 Kč byly tištěné díly. Zatímco posuv XY od firmy Thorlabs stojí 3240 Kč. Toto může být velkým přínosem vzhledem k vylepšování a upravování návrhů. Mohou posloužit jako rychlá krátkodobá alternativa v případě, že není k dispozici komponent z klasických materiálů. Zároveň se nabízí prostor pro další experimenty, ve kterých by se navržené díly mohly vyrobít z jiných materiálů či jinou technologií 3D tisku. Já jsem při výrobě použila doporučená nastavení tisku od výrobce pro konkrétní materiály. Předmětem dalšího výzkumu by mohlo být nejenom použití jiných materiálů či technik, ale i změna některých doporučených nastavení a zjištění, zda by to nezlepšilo vlastnosti vyrobených komponentů.

Dalším cílem diplomové práce bylo vytvořit komplexní mechanismus kombinující elektrické a mechanické součástky s 3D tištěnými díly zahrnující mechanický návrh, výrobu, sesazení a elektrické zapojení včetně software na jeho řízení. Vyroben byl polarimetr, který lze použít na měření polarizovaného světla a ke zjištění některých jeho parametrů, jako např. typ polarizace včetně zjištění úhlu natočení a zobrazení polarizační elipsy. Zároveň ale nelze zjistit směr polarizace. Výsledky měření vyrobeného polarimetru a polarimetru komerčního od firmy Thorlabs byly velice podobné jen s drobnými odchylkami. Jedním z nedostatků vyrobeného polarimetru je nutnost nastavení natočení uchycené polarizační fólie do nulové polohy. Nabízí se další vylepšení tohoto systému, například automatická kalibrace orientace rotující polarizační fólie při přiložení polarizátoru na vstupní otvor polarimetru nebo kompenzace offsetu měřené křivky způsobené temným proudem fotodiody či parazitním světlem

dopadajícím na fotodiodu. Přístroj a ovládací software je rovněž možné modifikovat pro měření částečně polarizovaného světla určité vlnové délky nahrazením polarizační fólie čtvrtvlnnou destičkou a pevným uchycením polarizátoru před čip fotodiody. V současné podobě může mít toto zařízení využití při justování složitých systémů, kde je nutné zajistit co nejlépe definovanou polarizaci laserového svazku, například u optických mikromanipulačních technik či pokročilých zobrazovacích experimentů.

Vzhledem k tomu, že parametry jednotlivých tištěných dílů jsou dány metodou 3D tisku, nejsou k práci přiloženy výrobní výkresy, ale pouze 3D návrhy ve formátu .stl. Sestavení jednotlivých zařízení a použité součástky jsou popsány v textu práce.

## Seznam příloh

### CD

- Elektronická verze diplomové práce
- Návrhy 3D tištěných dílů ve formátu .stl
- Software na řízení polarimetru a krokového motoru



## Seznam použité literatury

### Reference

- [1] GAO, Xia, Shunxin QI, Xiao KUANG, Yunlan SU, Jing LI a Dujin WANG. Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond. *Additive Manufacturing* [online]. 2021, (37), 101658 [cit. 2021-02-28]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101658>
- [2] SINGH, Sunpreet, Gurminder SINGH, Chander PRAKASH a Seeram RAMAKRISHNA. Current status and future directions of fused filament fabrication. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2020, **55**, 288-306 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.049](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.049)
- [3] PENG, Tao, Karel KELLENS, Renzhong TANG, Chao CHEN a Gang CHEN. Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, **21**, 694-704 [cit. 2021-04-08]. ISSN 22148604. Dostupné z: [doi:10.1016/j.addma.2018.04.022](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.022)
- [4] *ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (Withdrawn 2015), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012* [online]. In: . [cit. 2021-02-15].
- [5] ISAACSON, Abigail, Stephen SWIOKLO a Che CONNON. 3D bioprinting of a corneal stroma equivalent. *Experimental Eye Research* [online]. 2018, **173**, 188-193 [cit. 2020-11-11]. ISSN 00144835. Dostupné z: [doi:10.1016/j.exer.2018.05.010](https://doi.org/10.1016/j.exer.2018.05.010)
- [6] HASTINGS, Conn. Scientists 3D-Print Human Heart Pump. In: *Med gadget* [online]. 2020 [cit. 2020-11-11]. Dostupné z: <https://www.medgadget.com/2020/07/scientists-3d-print-human-heart-pump.html>

- [7] KUMAR, L. a C. KRISHNADAS NAIR. Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry. *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*. Singapore: Springer, 2017, s. 39-54. ISBN 978-981-10-0812-2.
- [8] ALHIJJAJ, Muqdad, Peter BELTON a Sheng QI. An investigation into the use of polymer blends to improve the printability of and regulate drug release from pharmaceutical solid dispersions prepared via fused deposition modeling (FDM) 3D printing. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* [online]. 2016, (108), 111-125 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2016.08.016>
- [9] MX3D Bridge. In: *MX3D* [online]. Amsterdam, 2019 [cit. 2020-11-11]. Dostupné z: <https://mx3d.com/projects/mx3d-bridge/>
- [10] ELKASEER, Ahmed, Stella SCHNEIDER a Steffen SCHOLZ. Experiment-Based Process Modeling and Optimization for High-Quality and Resource-Efficient FFF 3D Printing. *Applied Science* [online]. 2020, **10**(8), 2899 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/app10082899>
- [11] SHABANA, Shabana, R.V.Nikhil SANTOSH, Jajimoggala SAROJINI, Kothapalli ARUN VIKRAM a V.V.K. LAKSHMI. Evaluating the Mechanical Properties of Commonly Used 3D Printed ABS and PLA Polymers with Multi Layered Polymers. *International Journal of Pavement Engineering* [online]. 2019, **8**(6), 2351-2356 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: doi:[10.35940/ijeat.F8646.088619](https://doi.org/10.35940/ijeat.F8646.088619)
- [12] SALAZAR-SERRANO, Luis, Juan TORRES a Alejandra VALENCIA. A 3D Printed Toolbox for Opto-Mechanical Components. *Plos One* [online]. 2017, **12**(1) [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169832>
- [13] MAZURCHEVICI, Andrei, Dumitru NEDELCU a Ramona POPA. Additive manufacturing of composite materials by FDM technology: A review. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences* [online]. 2020, **27**(2), 179-192 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <http://op.niscair.res.in/index.php/IJEMS/article/view/45920>



- [14] *Prusa Research by Josef Prusa* [online]. Praha: Prusa Research, 2020 [cit. 2020-11-11].  
Dostupné z: [www.prusa3d.com](http://www.prusa3d.com)
- [15] CHENLONG, Zhang, Anzalone NICHOLAS C., Faria RODRIGO P. a Pearce JOSHUA M. Open-Source 3D-Printable Optics Equipment. *Plos One* [online]. 2013, **8**(3) [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0059840>
- [16] *Thingiverse* [online]. New York: MakerBot Industries, c2009-2021 [cit. 2021-04-19].  
Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/>
- [17] SHARKEY, James, Darryl FOO, Alexandre KABLA, Jeremy BAUMBERG a Richard BOWMAN. A one-piece 3D printed flexure translation stage for open-source microscopy. *Review of Scientific Instruments* [online]. 2016, **87**(2) [cit. 2020-11-30].  
Dostupné z: [doi:10.1063/1.4941068](https://doi.org/10.1063/1.4941068)
- [18] ANZALONE, Gerald, Alexandra GLOVER a Joshua PEARCE. Open-Source Colorimeter. *Sensors* [online]. 2013, **13**(4), 5338-5346 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s130405338>
- [19] BERNARD, Pawel a James MENDEZ. Low-Cost 3D-Printed Polarimeter. *Journal of Chemical Education* [online]. 2020, **97**(4), 1162–1166 [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b01083>
- [20] *Safibra* [online]. Říčany: Safibra, s.r.o., 2021 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <http://www.safibra.cz>
- [21] *Thorlabs* [online]. Newton: Thorlabs, Inc., c1999-2021 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.de>
- [22] LIŠKA, Miroslav. Optické sešity. *Ústav fyzikálního inženýrství* [online]. Brno, 2017 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <http://physics.fme.vutbr.cz/ufi.php?Action=0&Id=2460>
- [23] FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. *Optika a atomová fyzika I. Optika*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961.

[24] COLLETT, Edward. *Field guide to polarized light*. Bellingham: The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2005. ISBN 0-8194-5868-6.

[25] *Zotrax* [online]. Olsztyn: Zortrax, 2020 [cit. 2020-11-11]. Dostępne z: <https://zortrax.com>